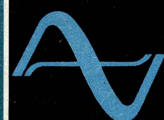
Jean Hiraga

# LES HAUT-PARLEURS

3 ème EDITION




Diffusion






Diffusé par EYROLLES
61 bld Saint Germain 75240 Paris Cedex 05

Dépôt légal : 2e trimestre 1989

# Les haut-parleurs

**3e édition**

**(revue et augmentée)**

*Toute découverte de la science pure*
*est subversive en puissance;*
*toute science doit être parfois traitée*
*comme un ennemi possible.*

*A. Huxley*

Jean Hiraga

# LES HAUT-PARLEURS

3e édition

(revue et augmentée)

# Préface

*L'histoire du haut-parleur est inséparable de celle de la haute-fidélité. L'étape la plus significative vers une haute qualité de reproduction fut certainement l'apparition, en 1925, du haut-parleur électro-dynamique de Rice et Kellogg. Extrapolé sous diverses applications, ce principe est resté le plus utilisé, malgré la concurrence des transducteurs électrostatiques, ioniques ou encore dynamiques sur films fins.*

*A ses débuts, le développement des haut-parleurs fut trop souvent le fait d'applications intuitives où les chercheurs sélectionnaient les matériaux et leurs montages selon une logique élémentaire.*

*Le résultat de chaque projet était apprécié subjectivement, avec l'aide de quelques mesures routinières. Il est surprenant de voir les progrès accomplis avec des méthodes aussi frustres. Cependant, il ne fait aucun doute que la technologie avancée des années 70 a fortement accéléré les développements, tout en augmentant la maîtrise des problèmes relatifs aux haut-parleurs, surtout si l'on considère que désormais les travaux s'appuient sur des fondations beaucoup plus solides.*

*Les haut-parleurs font partie d'un groupe d'appareils communément appelés transducteurs électro-acoustiques. Les transducteurs font appel à bien d'autres sciences de base que les autres composants audio. On peut citer la mécanique statique et dynamique, l'acoustique et les vibrations, la thermo-dynamique, la technologie électrique, la chimie et la théorie des filtres. Il est facile d'imaginer que tous ces problèmes vont faire appel à des calculs mathématiques très complexes. C'est pour cette raison que l'ordinateur a été d'un apport considérable pour les épures du haut-parleur. La capacité d'effectuer des calculs extrêmement complexes, qui défiaient auparavant la patience et les possibilités de l'homme, a imposé l'ordinateur aux ingénieurs et aux chercheurs.*

*Le cerveau humain est pourtant supérieur sur bien des points, notamment pour acquérir, mémoriser et analyser les informations. C'est pour cette raison que nous devons également tenir compte des tests d'écoute afin d'évaluer le résultat final.*

*Et c'est cette association des moyens sophistiqués de l'ordinateur et de l'expérience humaine qui a permis de progresser de plus en plus vite.*

*Heureusement, il reste encore un long chemin à parcourir et des ouvrages techniques comme ce livre sont des outils extrêmement utiles qui ouvrent le chemin du progrès.*

*Raymond E. Cooke*

*(O.B.E., B.Sc. Eng.)*

*Octobre 1980*

# Introduction

*Passer en revue toutes les réalisations ayant trait au haut-parleur en trois cent pages est une tâche ardue, voire impossible. En retracer l'historique demande déjà une recherche minutieuse qui se traduirait sans doute par un volume entier pour certains constructeurs. Par contre, compte tenu du passé prestigieux de certains d'entre-eux, il est certain que des redécouvertes pleines d'intérêt pourraient être faites. Les théories en cause, seulement maîtrisées par quelques initiés, sont tellement vastes que les limites en semblent infinies. Compiler toutes les recherches effectuées jusqu'à ce jour, en un seul ouvrage exige donc de condenser au plus court tous les éléments, avec évidemment un tri arbitraire.*

*Les livres traitant du haut-parleur ont existé, principalement d'origine anglo-saxonne. En langue française, de tels ouvrages sont déjà plus rares. Quelques livres édités vers les années 50-60 sont devenus introuvables.*

*Contrairement à ce que l'on pourrait penser, tout, ou presque, a déjà été dit sur le haut-parleur. La compréhension des langues étrangères et l'accès aux documentations souvent éparses ou jalousement gardées sont les principales barrières. Les laboratoires de recherche de certaines firmes, voulant rester à « l'avant garde », se sont ainsi constitué une énorme documentation, à même de mettre l'eau à la bouche aux milliers de passionnés en électro-acoustique. Mais il est rarissime que le public ait accès à ces « trésors ». Les revues ont aussi publié, au cours des années, de nombreux articles, certains inédits ou d'un intérêt capital. Malheureusement, tout ce travail a été oublié au cours des années. A présent on se trouve dans une situation telle que certains constructeurs, malgré un passé pouvant remonter à 1920, se voient contraints de recourir aux petites annonces et payent à prix d'or des modèles anciens ou même des documentations, simplement pour combler des manques dans leur collection. D'autres constructeurs, plus soucieux du futur que du passé, ne savent même plus très bien ce qu'ils avaient réalisé autrefois. Une connaissance aussi large que possible de toutes les réalisations semble pourtant essentielle, par le retour qu'elle permet vers les origines de tous les principes, permettant de mieux appréhender les problèmes des inventeurs et les moyens mis en œuvre pour les résoudre.*

*Ce livre n'a pas la prétention de traîter d'une manière exhaustive tous les domaines du haut-parleur : historique, théorie, pratique. Certains livres pourtant passionnants, sont trop incomplets, trop théoriques, ou trop pratiques. Ils n'arrivent ainsi qu'à traiter une partie du problème.*

*C'est justement ce qu'à voulu éviter l'auteur de cet ouvrage, en réalisant la synthèse des différentes théories ayant existées et de leurs mises en pratique, dans une démarche qui permet de tirer l'essentiel de ce domaine. Sans vouloir être une « bible » sur le haut-parleur, ce livre doit permettre d'apprécier le chemin parcouru, de comprendre le pourquoi de certaines réalisations et de prendre conscience des lacunes à combler.*

*L'auteur remercie tout particulièrement Patrice Bibring pour sa collaboration lors de la mise en forme de ce livre.*

*Il remercie également les nombreuses firmes qui ont permis la publication des documentations.*

*Ce livre est dédié à Mac Lachlan, Olson, G.A. Briggs, R.E. Cooke, R. Lafaurie, R. Léhmann, H. Nakajima, T. Saeki, H. Niwa, E. Koïzumi.*

**Première partie**

# Les haut-parleurs

Quelle est l'origine du haut-parleur ? Où commence sa longue et passionnante histoire ? Sans doute est-il nécessaire de remonter aux bases de sa conception.

Son inventeur, Graham Bell, doit sa renommée internationale à une autre grande invention : Le téléphone.

Graham Bell naît en 1847 à Edimburg, capitale de l'Ecosse. Il y poursuit ses études supérieures et reçoit un diplôme de docteur en médecine. En 1870, il réside deux années au Canada, puis s'installe à Boston où une chaire de physiologie vocale lui est confiée à l'université. En 1876, après maintes recherches, il expose un appareil pour la transmission du son. Cet appareil était en fait destiné aux sourds : il visualisait les vibrations sonores. A cet effet, une fine lame métallique est disposée entre le noyau d'une bobine électrique et un aimant. Les vibrations engendrées sont ensuite transmises par un fil électrique. Le récepteur est composé des mêmes éléments. Il transmet le signal perçu à une lame métallique qui se met en vibration. Perfectionnant la sensibilité de son appareil, Graham Bell découvre qu'il est possible non seulement de transmettre des « vibrations visibles », mais encore de reproduire à distance la voix humaine, ceci, bien sûr au prix d'un faible niveau et de déformations acoustiques. Cette découverte est à l'origine de l'invention du téléphone.

En 1878, Graham Bell invente le « Photophone ». Cet appareil transmet à distance la voix humaine par modulation de la lumière. L'appareil est à la fois simple et ingénieux. Les vibrations acoustiques se transmettent à

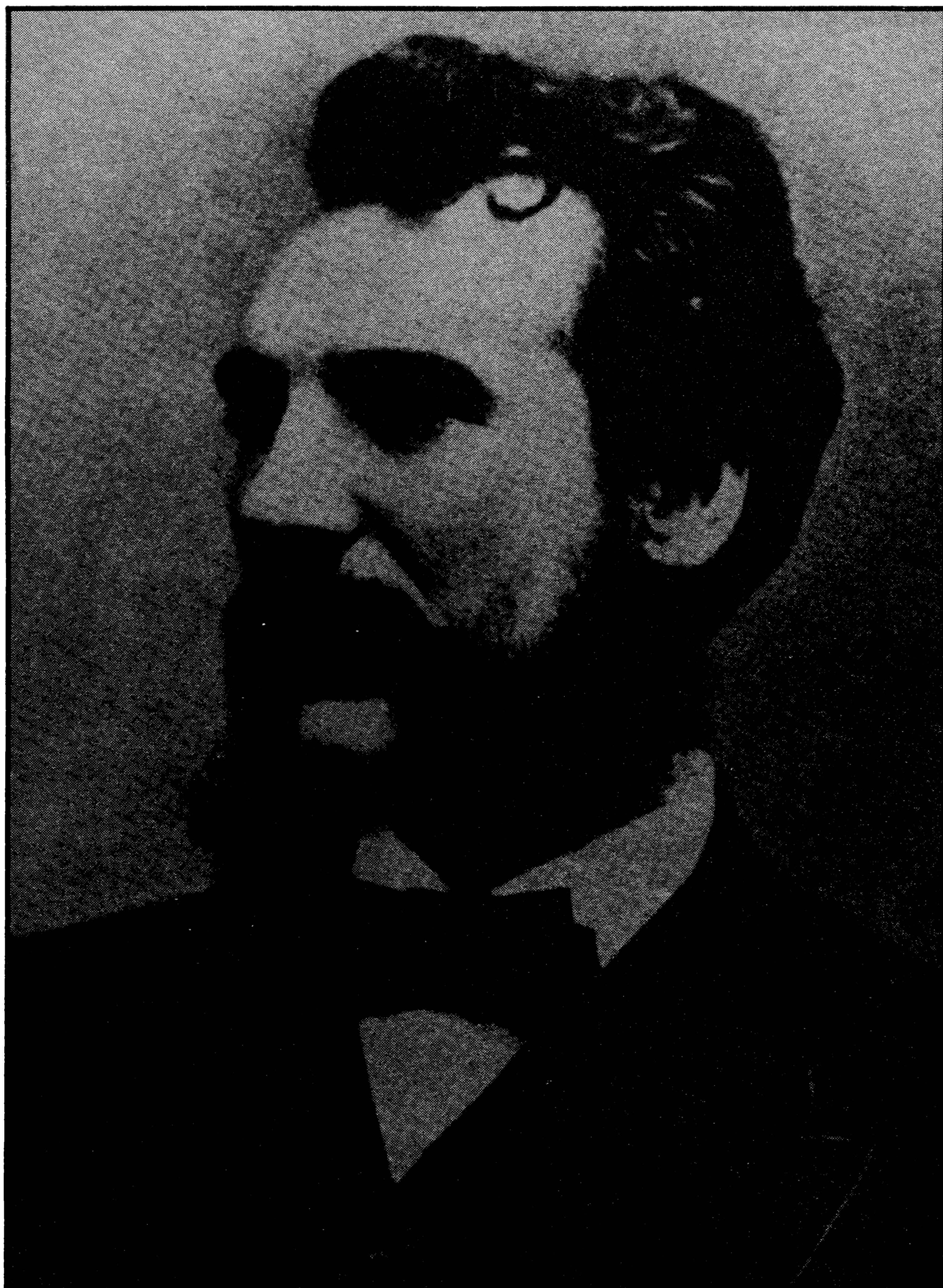


*Fig. 1 : Graham Bell (1847-1922), inventeur du téléphone. Son appareil, exposé en 1976 et destiné à la transmission du son est à la fois à l'origine du téléphone et du haut-parleur.*

une fine membrane. Un rayon lumineux attaque celle-ci en biais, est modulé par les vibrations et ensuite reçu par un miroir. A partir de ce même principe, Graham Bell réalisa, peu après Edison et Charles Cros, un phonographe. L'enregistrement et la lecture ne faisaient appel qu'à des phénomènes optiques, d'où son originalité. En quelque sorte, le disque « laser » sans laser.

Graham Bell reçut maintes récompenses honorifiques, entre autre la médaille Albert de la Société Royale des Arts en 1918 et la médaille Hugues peu après. Il est également le fondateur de la grande et prospère firme Bell Systems renommée tant hier qu'aujourd'hui pour ses recherches diverses, notamment dans le domaine du haut-parleur.

Graham Bell s'éteint en août 1922.

L'écouteur que Graham Bell inventa pour son téléphone était la première machine qui utilisait la force motrice pour le haut-parleur : la « Machine qui parle haut ».

## Mécanismes où la force motrice est créée par le principe électro-magnétique

1.- Système de levier à armature mobile.

Ce système est représenté d'une façon simplifiée sur la figure 3. C'est sans doute l'appareil de ce type le plus simple. Il utilise un aimant permanent en forme de U. Son flux est envoyé vers des pièces polaires sur lesquelles sont disposées des bobines d'impédance de 600 à 1 500 ohms. Le centre du circuit magnétique ainsi

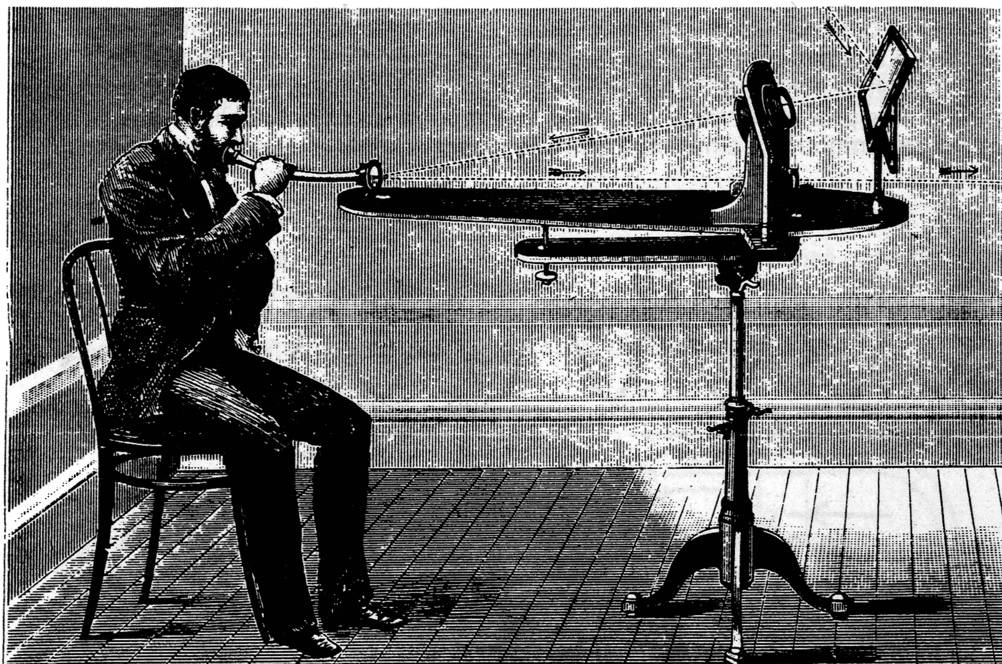


*Fig. 2 : « Photophone » de Graham Bell. Cet appareil pouvait transmettre les sons à distance par modulation de la lumière. Toujours selon ce principe, il proposa également un phonographe enregistrant selon un procédé optique et reproduisant les sons grâce à un système photo-électrique.*

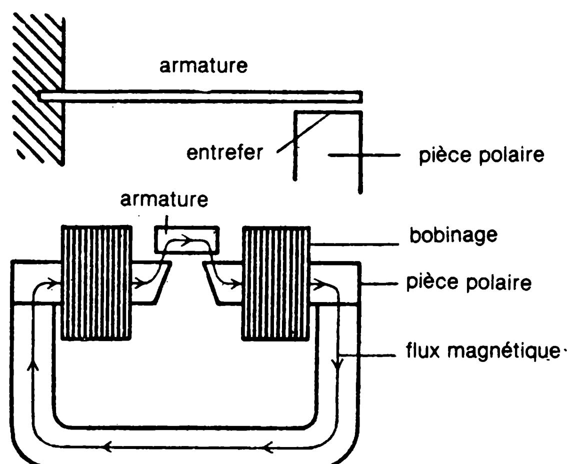



*Fig. 3 : Principe de l'armature mobile simple. C'est une languette de métal ferreux, placée au dessus et à proximité de l'entrefer d'un circuit magnétique. C'est le principe de l'écouteur téléphonique proposé par Graham Bell.*

formé par l'aimant et les pièces polaires, possède un entrefer biseauté. Comme l'indique la figure, le flux est dirigé vers une amature en fer doux placé juste au-dessus de l'entrefer. Une vis permet de régler la distance entre l'armature et l'entrefer. Cette distance est très critique. En effet, lorsqu'elle diminue, l'attraction magnétique augmente selon une variation au carré. Cette non-linéarité de la force d'attraction, fonction de la distance armature/pièce polaire provoquera une déformation du signal acoustique reproduit, par rapport au signal appliqué aux bobines. La figure 4 montre la différence entre le signal original et le signal reproduit.

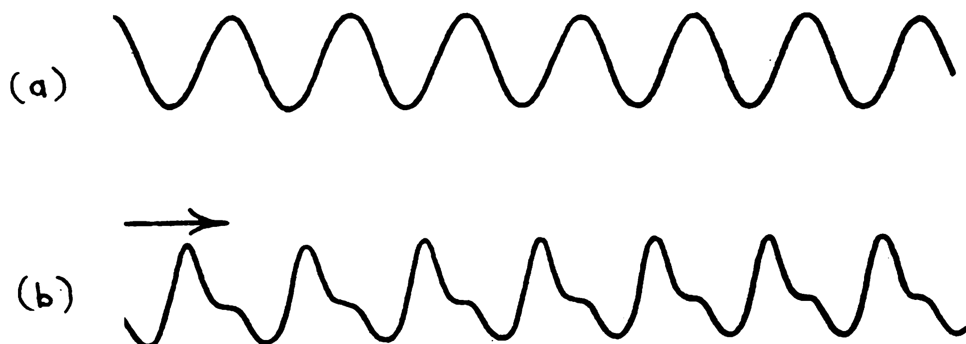



***Fig. 4 Forme du signal appliqué (a) et forme du signal reproduit (b) de l'écouteur téléphonique de la fig. 3. Par loi de variation d'attraction selon l'inverse carré, une déformation naît à la reproduction acoustique du signal, produisant des harmoniques. (d'après Mac Lachlan, Loudspeakers, 1934).***

Mac Lachlan, lorsqu'il publia en 1934 son fabuleux livre « Loudspeakers », cita le moyen de remédier à ce défaut de non linéarité. Il suffisait de faire varier l'angle d'attaque par rapport au plan des pièces polaires (figure 5).

On obtenait alors un signal acoustique moins distordu, à condition de faire travailler l'ensemble dans une marge raisonnable. Sur la figure 5 on voit en (a) que l'attraction est plus forte au point X2 qu'au point X1, et qu'un mouvement trop important de la lamelle aura pour effet de faire talonner celle-ci. En (c), le point A étant placé au-dessous de la pièce polaire, on obtient un meilleur compromis si la position de repos est judicieusement choisie.

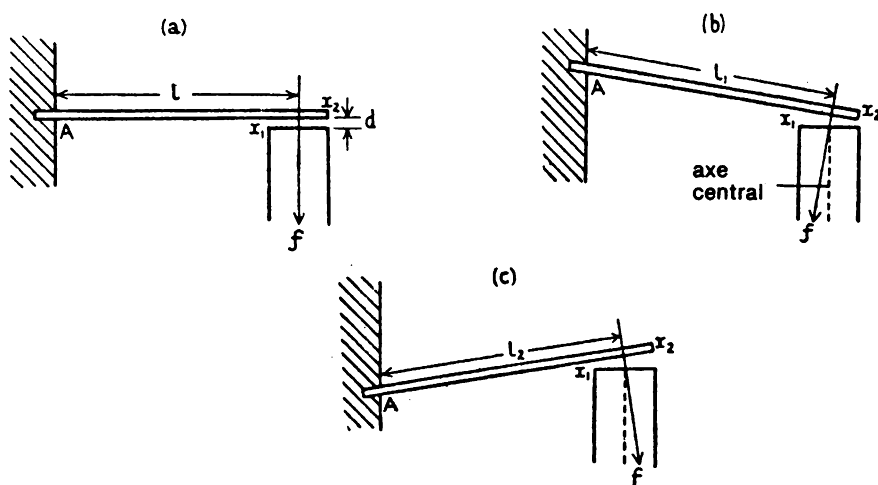



*Fig. 5 : En faisant varier l'angle d'attaque de l'armature par rapport au plan des pièces polaires de l'entrefer, on peut, dans une certaine mesure, réduire la distorsion dûe à ce principe. (selon Mac Lachlan, Loudspeakers, 1934).*

2 - Système de levier travaillant en push-pull

Ce système dérive du précédent. Il est plus sensible et a été utilisé dans de nombreux casques et haut-parleurs de l'époque.

La figure 6 en montre deux versions. Le levier (ou armature) est cette fois muni d'un pivot placé symétriquement par rapport aux pièces polaires.

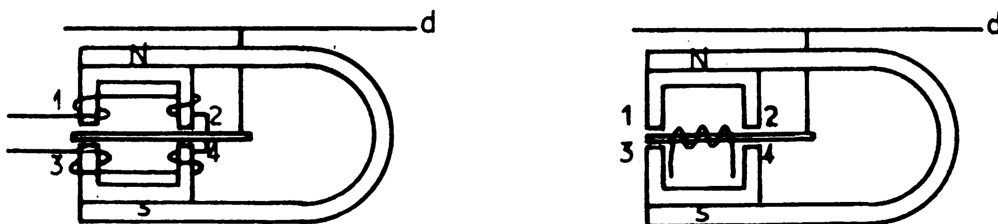



*Fig. 6 : Levier dit « Push-pull », destiné à réduire en partie les défauts du système à armature simple. Malgré des améliorations certaines, son défaut est de ne pouvoir obtenir des niveaux acoustiques importants.*

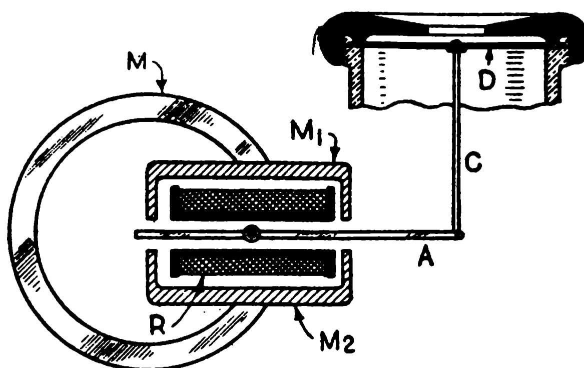



*Fig. 7 : Ecouteur dit de « Baldwin ». Un seul bobinage est cette fois utilisé. Ce système dit « Push-pull » a obtenu un grand succès pour sa sensibilité remarquable. L'armature (A) est en fer doux et pivote entre deux pièces polaires en forme de « U » ($M_1$ et $M_2$), elles-mêmes montées sur un aimant en fer à cheval. L'armature (A) est reliée à une fine tige (C) fixée sur un diaphragme en mica. Le bobinage unique est représenté par R. La variation de flux provoquée par le passage du signal dans la bobine, se combine avec le flux de l'aimant permanent et va donner une distribution magnétique totale assymétrique dont le résultat va être la mise en mouvement de l'armature et de la membrane.*

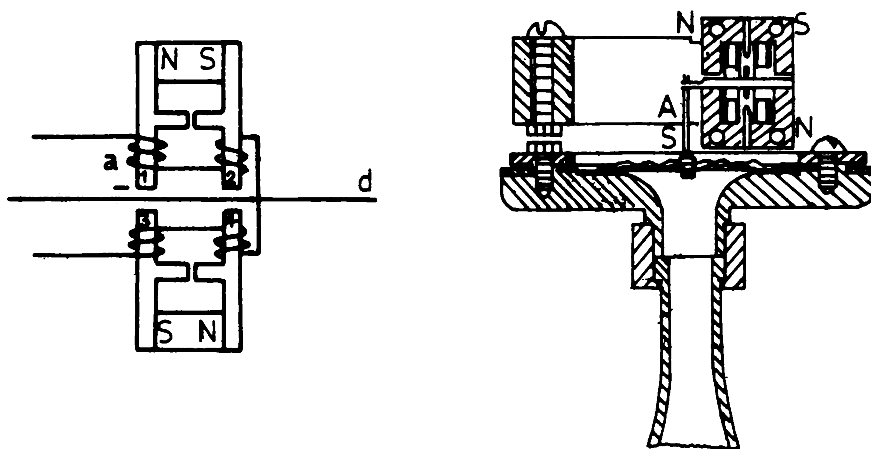



*Fig. 8 : Autre système de transducteur utilisant deux aimants et quatre bobinages. Ce système a été utilisé sur certains écouteurs téléphoniques et sur des haut-parleurs à pavillon.*

Il est possible d'utiliser deux ou quatre bobinages, ou un bobinage mobile, placé sur le levier. Ces dispositifs sont munis de systèmes mécaniques de rappel, le plus souvent un ressort ou une tige de renvoi. Par rapport au levier simple, l'armature n'est plus attirée en permanence du même côté (ce qui créait un déséquilibre). Le levier va ainsi travailler à partir d'une position d'équilibre, attiré des deux côtés par des forces égales.

Les dispositions des figures 6 et 7 n'utilisent qu'un aimant. Par contre la figure 8 montre une combinaison de deux aimants et quatre bobinages. Ces solutions sont toujours loin de l'idéal. Elles apportent cependant, certes au prix de résonances et d'un niveau acoustique limité, un rendement de l'ordre de 2 à 8 %. Leurs réglages

sont en outre plus simples lors du montage. Le levier peut, bien sûr, être relié soit à une membrane, soit à un diaphragme qui débouchera sur un pavillon.

Dans l'écouteur téléphonique de Baldwin (figure 7), qui n'utilise qu'un seul bobinage, le levier est relié par l'intermédiaire d'une tige à un diaphragme de mica.

Une application (figure 9) consiste à relier la tige à une grande double membrane, formée de deux cônes très ouverts et collés ensemble sur leur périphérie. La tige actionne l'un des centres de ces cônes et le système transducteur est fixé au centre du cône opposé. Ce système est l'un des rares qui ne nécessite pas de baffle, car ces deux membranes se déplacent en phase, mais dans des directions opposées. L'ensemble travaille non plus en piston (cas d'une membrane simple) mais comme un volume pulsant, augmentant ou diminuant.

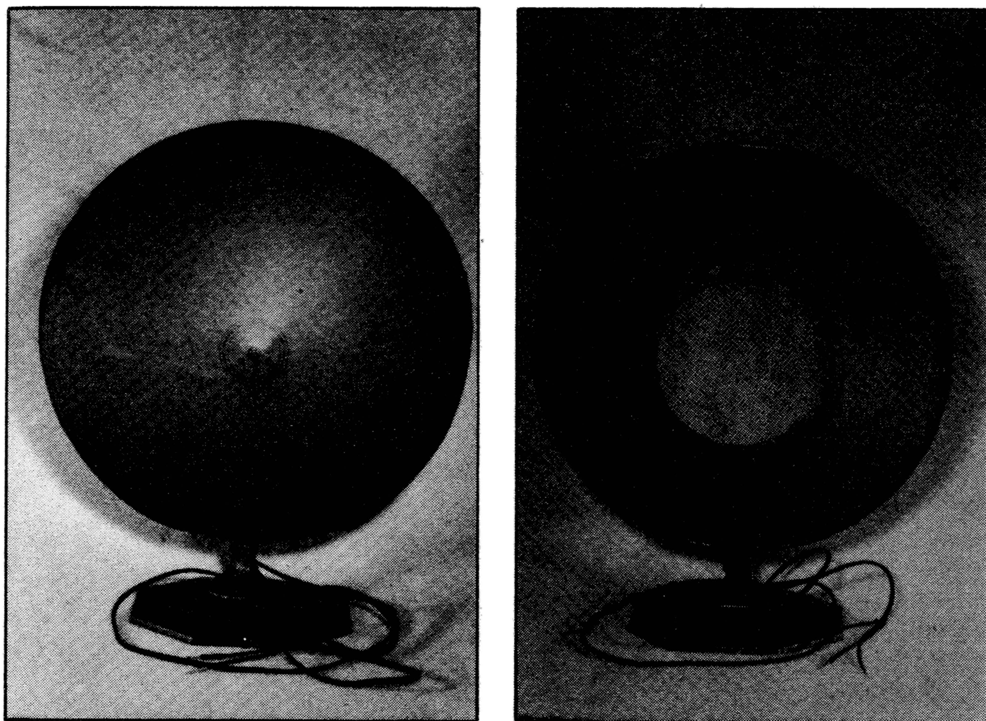


*Fig. 9 : Haut-parleur Western Electric (U.S.A.), utilisant le transducteur de la fig. 7 couplé à une double membrane en forme de parapluie. Les deux faces de la membrane travaillant en phase, il n'y a pas de court-circuit acoustique et l'appareil, malgré son volume relativement réduit (pas d'enceinte acoustique) donnait un volume sonore très généreux dans le grave. Cet appareil ( modèle WE 59A) a obtenu un grand succès vers 1920, au point que, pendant quelques années, les recherches diverses dans la technologie des haut-parleurs furent momentanément arrêtées.*

Ce système, proposé par la Western Electric vers 1920, eut tant de succès que les recherches sur les autres transducteurs, y compris ceux à pavillon, furent momentanément arrêtées. Avec son prix de revient modique, sa légèreté, la non nécessité de baffle ou d'enceinte acoustique, il était le seul à pouvoir reproduire le bas du spectre sonore avec un niveau satisfaisant. Sur les figures 9 et 10 on voit un exemple de ce genre de haut-parleur, d'origine Western Electric. Il a été imité par plusieurs marques et ce dans plusieurs pays. Il présentait le même défaut que les systèmes précédents : une bande passante limitée dans l'aigu à 4 ou 5 000 Hz. Ce

qui était malgré tout suffisant pour la reproduction de la radio en modulation d'amplitude.

3 - Haut-parleur électro-magnétique (dit aussi à fer mobile) push-pull.

Il est dérivé du principe de la figure 6 et en partie de celui de la figure 3, lui aussi symétrique. Comme indiqué en figure 11, deux petites pièces de fer doux, disposées dans les entrefers, sont cette fois utilisées.
Le signal qui traverse les deux bobines, augmente le champ magnétique de l'un des entrefers, attirant la pièce mobile en fer doux. Simultanément le champ magnétique de l'autre entrefer diminue. Comme pour tous les autres systèmes décrits précédemment, la fréquence de résonance la plus basse va dépendre de trois choses :
- de la masse dynamique des pièces en mouvement (diaphragme, mécanisme moteur).

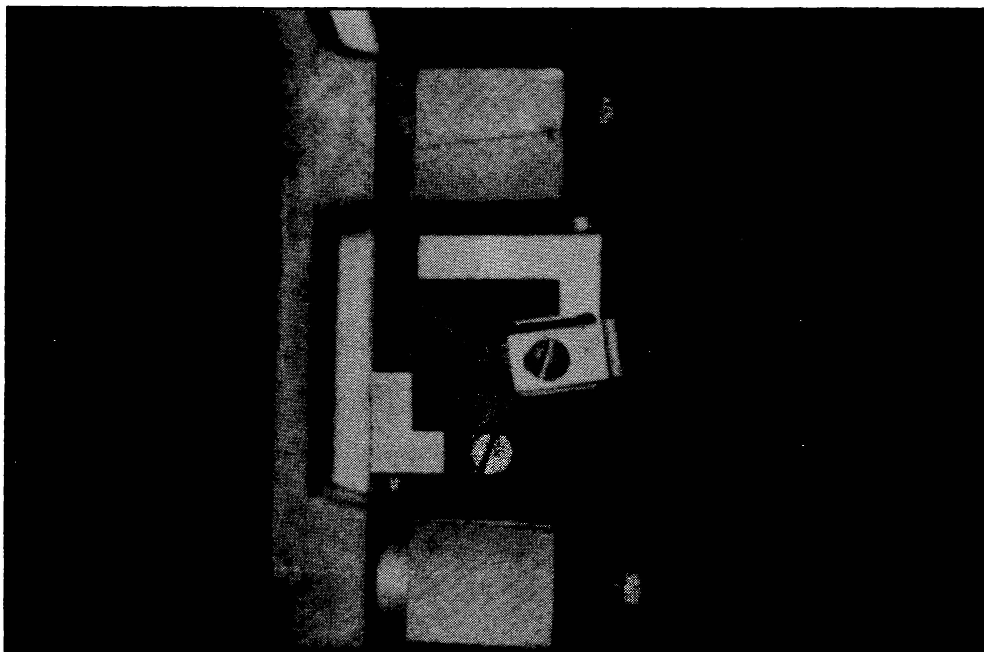


*Fig. 10 : Vue interne du transducteur Western Electric de la fig. 9. L'impédance de la bobine recevant le signal audio étant de l'ordre de 1 500 Ohms, une adaptation directe dans le circuit de plaque de l'étage de sortie de l'amplificateur était effectuée. Existant en deux diamètres différents, ce haut-parleur est pourvu d'une sonorité étonnante malgré son âge, en particulier dans le registre de bas-médium.*

- de la souplesse des suspensions et tiges de rappel
- de la force du champ magnétique.

Ce système est limité dans l'aigu et le niveau acoustique crée dépend principalement de la masse du cône. Dans le grave, ce système à tendance à résonner. Il provoque une irrégularité du niveau acoustique et doit être efficacement amorti.

La figure 12 montre un exemple de haut-parleur électro-magnétique, dit en anglais « Inductor type loudspeaker ». Bien que supérieur aux systèmes précédents, car permettant un déplacement un peu plus important du cône, son défaut le plus grave reste un rendement médiocre.

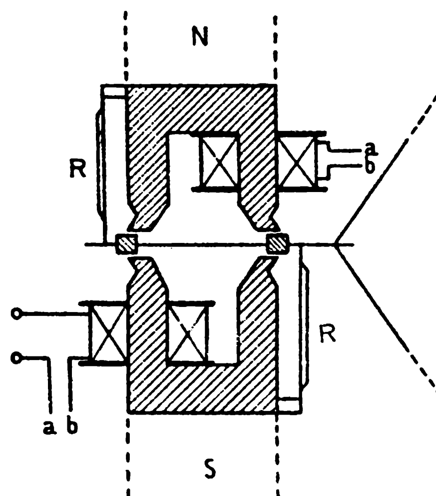



*Fig. 11 : Haut-parleur à fer mobile (push-pull).*
*Il utilise deux pièces en fer doux placées dans un entrefer double. Ce système permet d'augmenter légèrement l'amplitude de déplacement de l'armature et d'augmenter le niveau acoustique des sons graves. Par contre, le niveau acoustique maximum est assez limité, car le déplacement des fers mobiles doit s'effectuer dans un champ magnétique homogène.*

## 4 - Système à armature équilibrée

Il s'agit ici encore d'une variante de l'écouteur dit de « Baldwin ». Ce mécanisme est décrit sur la figure 13.

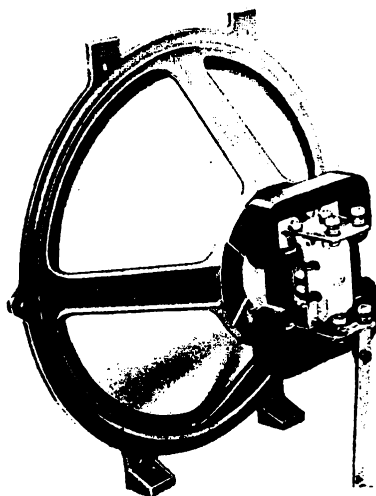


***Fig. 12 : Haut-parleur à induction, d'origine anglaise. C'est une des dernières réalisations avant l'ère du haut-parleur à bobine mobile.***

La transmission par le levier est différente, ainsi que la position de la suspension.

Par rapport au système de la figure 12, l'armature a une position de repos instable, en l'absence de signal. Un système de rappel est donc nécessaire, qui doit éviter que l'armature ne «colle » à l'un où l'autre côté des pièces polaires.

Ce système n'est linéaire que pour une bande passante étroite et donne un niveau acoustique réduit. La fréquence de résonance est toujours assez élevée, soit 1 000 à 2 000 Hz en l'absence de cône.

Tous ces principes eurent leur heure de succès, notamment les principes à fer mobile et à armature équilibrée. Ils étaient le plus souvent adaptés à des diaphragmes côniques ou à des pavillons souvent mal calculés.

A part le haut-parleur Western Electric (figures 9 et 10) aucun de ceux-ci n'était capable de reproduire parfaitement les fréquences graves. Il sera là nécessaire d'attendre la grande révolution du haut-parleur électro-dynamique.

De performances inégales, tous ces appareils étaient emprunts de nombreux défauts : manque de linéarité, fragilité, nécessité de réglages, résonances parasites, mauvais rendement, résonance principale trop élevé et souvent impossible à abaisser.

Pour clore ce chapitre consacré aux transducteurs basés sur la force électromagnétique, nous allons décrire quelques variantes.

Sur la figure 14 est décrit un haut-parleur du nom de « Stentorphone », conçu par

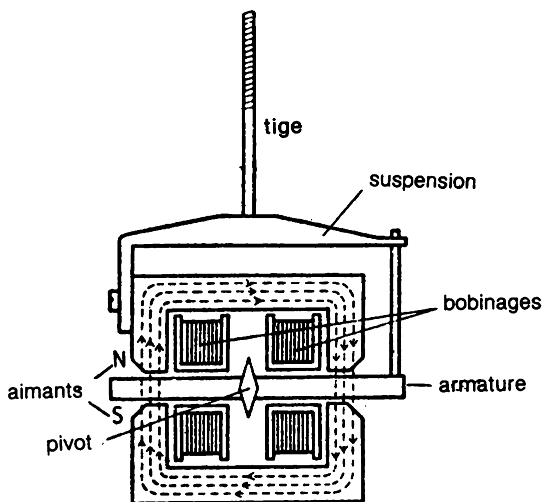



*Fig. 13 : Système à armature équilibrée. La fréquence de résonance est en général assez élevée et située entre 1 000 et 2 000 Hz.*

l'anglais Gaydon. Ce système très particulier utilisait un courant d'air passant à travers des fenêtres. Ce courant d'air était modulé par un obturateur mécanique, lui-même commandé par un électro-aimant. Ce mécanisme débouchait sur un pavillon.

Avec un écoulement d'air envoyé sous une pression appropriée, son rendement était remarquable. Malgré un signal d'origine faible, il procurait un niveau acoustique très élevé.

Cependant la masse importante des pièces mécaniques en mouvement (l'obturateur entre autre) limitait sa réponse dans les hautes fréquences. Les seuls, mais

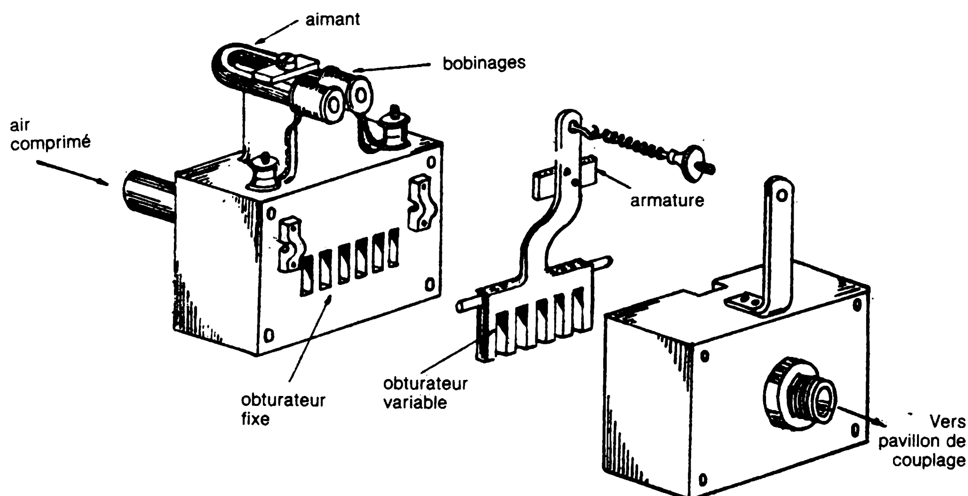



*Fig. 14 : Haut-parleur Stentorphone. Bien que de qualité acoustique médiocre, ce genre de haut-parleur a la particularité d'utiliser de l'air. Un système électromagnétique commande un obturateur variable. L'air comprimé est ainsi modulé. Ce système est capable de produire un niveau acoustique intense, ce qui peut le rendre intéressant pour certaines applications. Il a également été utilisé sur les phonographes (contrôle mécanique de l'obturateur).*

gros avantages de ce système étaient un rendement élevé et un niveau acoustique intense. Les nombreuses résonances et la bande-passante restreinte en limitaient par contre l'intérêt. Il reçut cependant des applications dans le domaine du phonographe.

Le Frénophone (figure 15) est, lui aussi, basé sur une idée très originale. Il s'agit d'amplifier par des procédés purement mécaniques les vibrations électriques transmises à une armature. Cet appareil conçu par un anglais, S.G. Brown, est encore exposé au musée des Sciences de Londres.

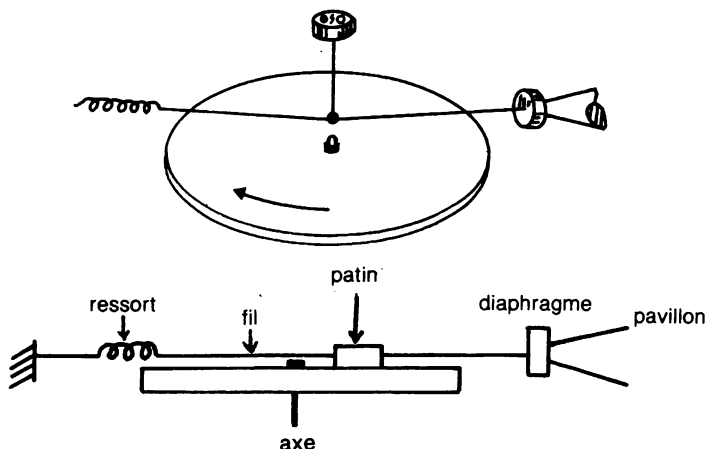



*Fig. 15 : Frénophone. Ce système particulier tente d'utiliser le frottement d'un patin soumis aux pressions variables d'un transducteur à fer mobile. Il module ainsi les sons, par effet de friction mécaniquement amplifié. Il est difficile à mettre au point.*

L'amplification « mécanique » était réalisée non pas par un levier, mais par un système plus particulier. Un disque lisse sur le dessus (verre poli) tourne à une vitesse assez lente (environ 25 tours/minutes). Un autre petit disque (sorte de patin) d'un diamètre d'environ 8 mm est appliqué sur le premier, près de la périphérie. Ce patin est retenu d'un coté par un fil et un ressort, de l'autre par une tige, elle-même reliée à un diaphragme communiquant avec un pavillon.

Sur le petit disque, utilisé tel un patin de frein et reposant sur la plaque tournante, est appliqué une fine armature en forme de *l*, mise en mouvement selon le procédé de l'écouteur de Bell. Ainsi, le mouvement du mécanisme se traduit par une pression modulée sur le petit disque.

Cette pression, conjuguée à la rotation du disque, tirait plus ou moins sur la tige reliée au diaphragme, amplifiant mécaniquement le mouvement de la petite armature. Basé sur un effet de frein, ce système a été baptisé « Frenophone ». Difficile à mettre au point, sujet à un bruit de fond important dû aux frottements, ce système compliqué et peu fiable n'a pas connu de succès.

## Autres mécanismes de force motrice

Il faudrait ajouter aux diverses idées, et solutions, proposées ci-dessus, ceux tirés des principes électro-dynamiques à ruban et à bobine mobile. Ils seront traités plus loin.

De même, le principe dit « ionique », ainsi que le principe électrostatique, seront traités dans un chapitre séparé. Il va surtout être question ici d'autres idées, qui, soit inintéressantes, soit compliquées ou n'ayant pas trouvé d'évolutions technologiques, ont été pour la plupart complètement abandonnées à l'exception, bien sûr, du tweeter piézo-électrique.

### 1 - Transducteur à cristal ou piezo-électrique

Pour transformer l'énergie électrique en énergie acoustique, il est, cette fois, fait appel aux propriétés physiques de certains cristaux. Ceux-ci, sous l'effet d'une différence de potentiel, se déforment géométriquement. Ce principe est encore rencontré dans quelques microphones ainsi que sur certains phonocapteurs.

Comme beaucoup de transducteurs électro-mécano-acoustiques, ce transducteur est réversible. Il peut être utilisé aussi bien en microphone qu'en haut-parleur.

Abandonné pour ses applications dans le domaine du haut-parleur, ce principe n'a resurgi qu'il n'y a une dizaine d'années. La firme américaine Motorola, est en grande partie à l'origine de cette résurrection, ayant mis sur le marché une série de tweeters à la fois performants, fiables, de rendement intéressant et de conception fort simple. La figure 16 montre un exemple de ce type de tweeter. La courbe d'impédance a généralement l'allure de celle de la figure 17. On note une résonance principale vers 1000 Hz (en réalité variable selon le type de cristal utilisé) suivie d'une chute, puis d'une remontée située dans des fréquences souvent supérieures à 10 kHz. C'est en fait un avantage en faveur de ce principe, vu qu'un transformateur d'impédance n'est pas nécessaire. La bande passante reproduite, toujours située dans l'aigu en raison de la faible compliance (souplesse) de l'élément transducteur, se situe à peu près à l'endroit de la charge nominale, soit la valeur conventionnelle de 8 ohms. Au-dessous de cette bande utilisable, non seulement le niveau acoustique baisse, mais la forte remontée de la courbe d'impédance protège efficacement ce tweeter.

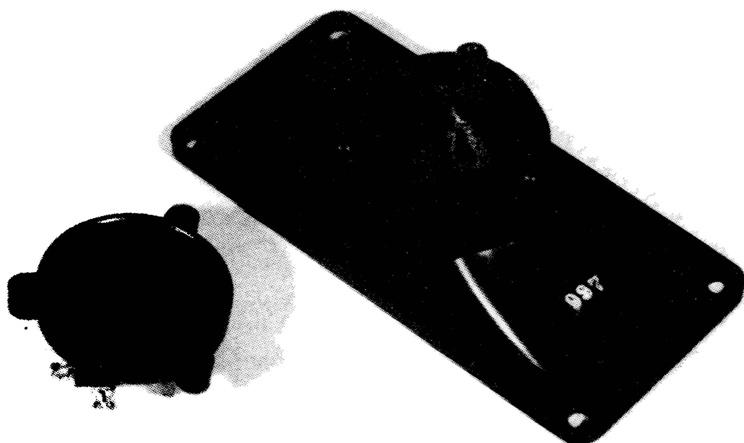


*Fig. 16 : Tweeter piezo-électrique. Longtemps resté dans l'oubli, ce genre de transducteur est redevenu à la mode. Il peut même s'utiliser pour la reproduction de haute fidélité.*

Ce type de transducteur perfectionné a été réalisé par Motorola, puis au Japon par le groupe Matsushita « Technics ». Une pastille de cristal dite « bimorphe » a été utilisée, composée en réalité de deux cristaux collés ensemble (colle époxy en général). Ce montage améliorant la linéarité de torsion vis-à-vis de la tension appliquée. La figure 18 représente un modèle créé par Technics en 1969. Il fut malheureusement rapidement abandonné, sans doute pour un problème de brevet ou de modèle déposé.

On voit sur le schéma le cristal bimorphe dont les deux faces sont reliées aux bornes d'entrée. Le centre du disque est relié à une tige d'aluminium dont l'autre extrémité est fixée à une sorte de « chapeau ». Ce cône, d'épaisseur 100 microns, possède une suspension gaufrée sur sa périphérie. Comme pour les tweeters Motorola, l'ensemble transducteur communique avec un pavillon (figure 18). Le rendement est excellent puisque voisin de 100 dB/m/W, soit pratiquement l'équivalent des tweeters à chambre de compression étudiés plus loin.

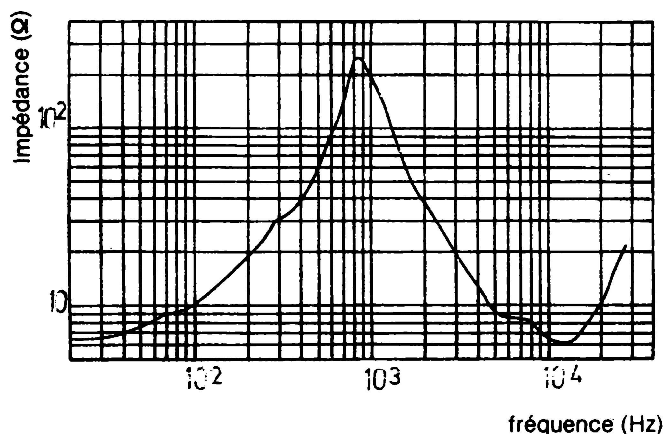



*Fig. 17 : Courbe d'impédance caractéristique d'un tweeter piezo-électrique.*

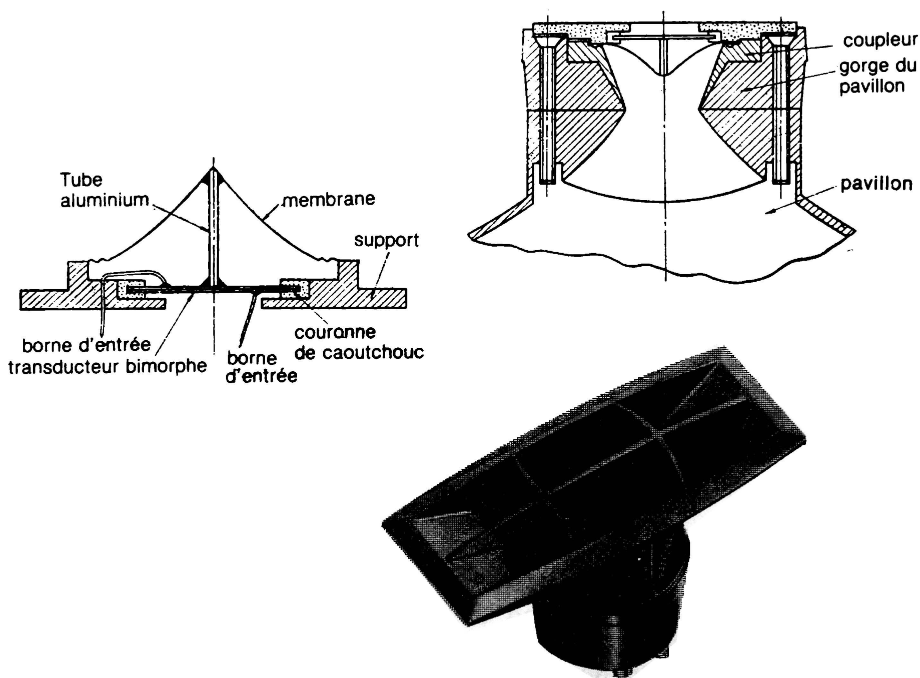



*Fig. 18 : Tweeter piézo-électrique d'origine japonaise (Technics, 1969). Vue en coupe du transducteur.*

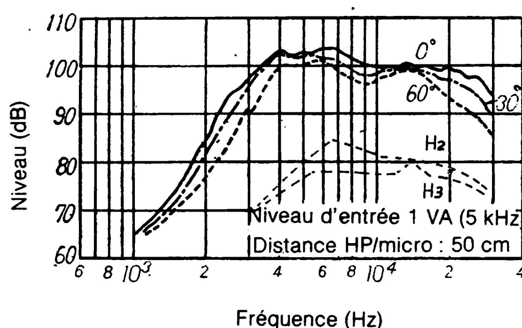



*Fig. 19 : Courbe amplitude/fréquence du tweeter piézo-électrique Technics.*

Sur la courbe de réponse amplitude/fréquence et sur celle du taux de distorsion par harmonique 2 et 3 (figure 19) on remarque une distorsion qui reste élevée. Mais l'absence de pièce polaire et d'aimant entraînant un coût très bas, autorise de nombreux perfectionnements. Ce type de transducteur peut être utilisé pour des reproductions de haute fidélité et atteint facilement des fréquences de 30 kHz. A noter que la transmission est indirecte, car elle fait appel à une membrane intermédiaire.

Le mylar, l'aluminium ou le papier ont été essayés. D'autres recherches ont porté sur la forme de la « pastille » transductrice, afin d'eviter les éventuels défauts de transmission mécanique. En résumé, le résultat final est donc largement fonction

du pavillon (forme et matériau), ainsi que de la conception de la membrane intermédiaire. La masse mobile totale et la souplesse du cristal ont également leur importance.

Déjà excellent, Ce haut-parleur pourrait devenir remarquablement bon s'il était mieux étudié. An moment où paraissent ces lignes, les recherches continuent tant en Europe qu'aux USA. Certains prototypes de tweeters permettent d'atteindre 100 kHz; d'autres descendent bien plus bas en fréquence que ce qui était prévu pour ce type de transducteur. L'avenir nous dira ce que l'on peut attendre d'un système simple et prometteur.

2 - Transducteur électrochimique Edison-Kinéophone

Proposé par Edison, le procédé utilise les forces de frottement entre un métal et une électrolyte. Le signal crée le passage d'un courant qui se traduit par une vibration proportionnelle à l'effet électrochimique. La figure 20 représente schématiquement en coupe ce « Kinéophone ». (M est la membrane en mica - C une pièce en or blanc reliée au centre de M - A est la pièce d'électrolyte de forme cylindrique et

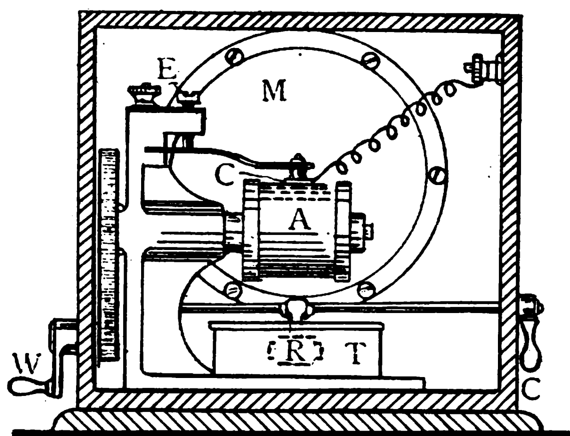



*Fig. 20 : Transducteur électro-chimique Edison « Kinéophone ».*
***Il utilise les propriétés de variation de frottement par effet électro-chimique. Son défaut est celui d'un bruit de fond important et la nécessité d'avoir une pièce tournante (manivelle ou moteur démultiplié).***

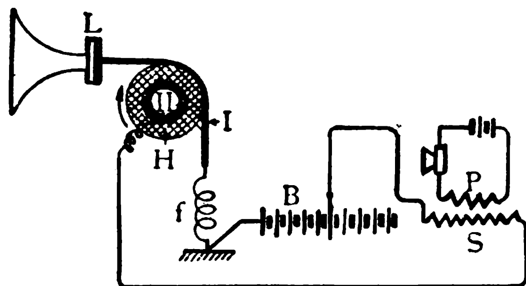



***Fig. 21 : Haut-parleur Johnson Rahbeck, utilisant les propriétés de frottement variable de deux métaux, l'un conducteur l'autre semi-conducteur. Comme pour l'appareil de la fig. 20, ce haut-parleur, inspiré du « Kinéophone » exige aussi une pièce en rotation permanente et produit un bruit de fond non négligeable.***

creuse, contenant une solution liquide à base de potassium et de craie). Au point de contact entre C et A passe le courant (signal). Sur le schéma, W est une manivelle que l'on doit tourner doucement. Ainsi, par cette méthode électrochimique, le signal, passant au point de rencontre entre C et A, est amplifié et renvoyé sur la membrane de mica M. Ce procédé est peu pratique et possède le gros défaut d'un bruit de fond important. Il nécessite en outre une pièce tournant en permanence à l'aide d'une manivelle ou d'un moteur.

3 - Transducteur Johnson Rahbeck.

C'est un appareil assez proche du Kineophone d'Edison. Il est basé sur un effet d'attraction, dit « effet Rahbeck » qui résulte du frottement de deux métaux l'un conducteur, l'autre semiconducteur. Sur la figure 21, on peut voir le mécanisme curieux de ce haut-parleur. I est une bande de métal, H un cylindre de métal (ou de

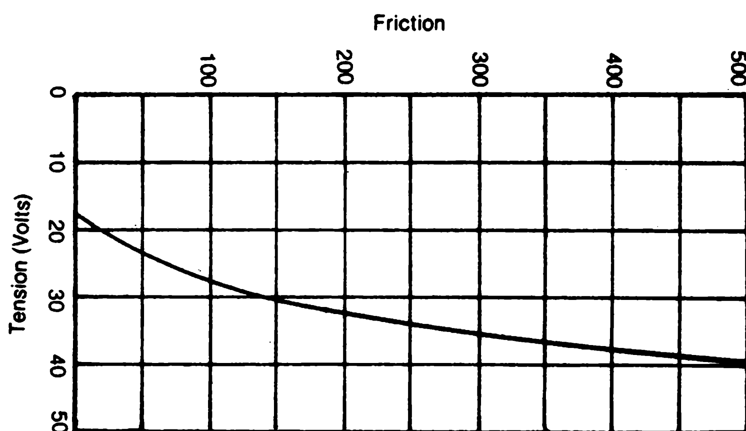



*Fig. 22 : Effet de la tension appliquée sur la friction résultante. (effet Rahbeck).*

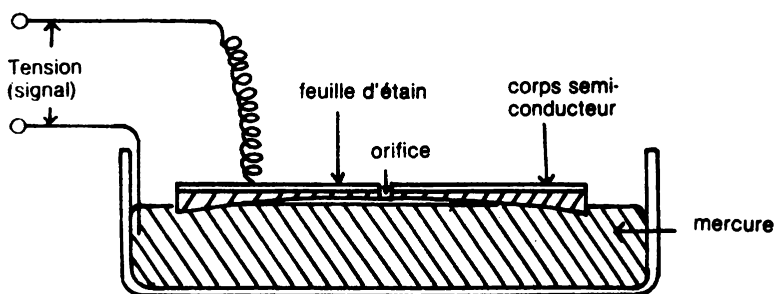



*Fig. 23 : Transducteur Barlow. C'est un système inspiré du principe Rahbeck. Le son, trop faible pour être utilisable, sort par l'orifice central.*

minerai) semi-conducteur, L le diaphragme amplificateur relié à un pavillon, B un accumulateur de 70 volts, P et S étant les primaires et secondaires d'un transformateur. Le primaire est relié à un microphone à charbon afin de démontrer le pouvoir transducteur du système. La figure 22 montre l'effet sur la force d'attraction de la

tension appliquée . Ce haut-parleur est en fait peu intéressant à cause d'un bruit de fond élevé.

Plusieurs autres systèmes plus ou moins proches de ceux d'Edison et de Johnson Rahbeck ont été essayés, aucun n'a remporté de succès. Deux autres ont été proposés au Japon vers 1876 par un certain Gennaï Hiraga, inventeur connu, qui avait proposé deux types de haut-parleurs basés sur le principe du Kineophone et du disque tournant Frénophone, appareil baptisé « Electère ».

4 - Transducteur Barlow à semi-conducteur

Le systeme a effet Johnson Rahbeck avait le gros défaut d'un bruit de fond elevé. Ceci était dû au frottement, pourtant nécessaire, des pièces transductrices.

C'est pourquoi l'anglais Barlow a l'idée de réaliser un autre haut-parleur (figure 23). Dans un récipient peu profond, un disque de minerai semi conducteur repose sur un bain de mercure .Ce disque soigneusement travaillé, présente un dessous légèrement concave et un dessus recouvert d'une feuille d'étain. Au centre du système, se trouve un trou de petit diamètre. Le signal est injecté sur le dessus du

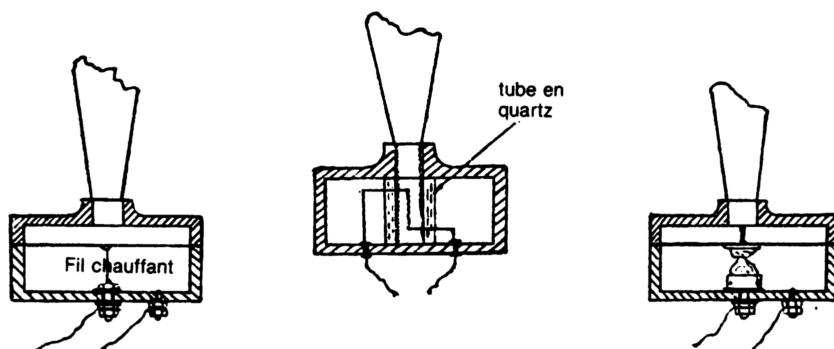



*Fig. 24 : Haut-parleur Thermophone utilisant les propriétés de dilatation d'un fil chauffé à blanc dans un gaz. Le fil est généralement fixé au centre de la membrane émettrice.*

disque et doit traverser le corps semi-conducteur pour atteindre le bain de mercure. Par effet Rahbeck, le centre du disque va se trouver plus ou moins attiré par le mercure et un son faible va sortir par l'orifice central. La masse importante du système laisse présager un mauvais rendement et une bande passante réduite. En fait, le niveau accoustique émis par le système Barlow original était si faible qu'il ne permît aucune application pratique. Et en plus il ne pouvait fonctionner qu' horizontalement, émettant un son dirigé vers le haut.

5 - Transducteur Thermophone

Un fil chauffé tire sur le centre d'une fine membrane métallique couplée à un pavillon. Trois applications de ce genre de transducteur ont vu le jour. La première utilise un simple fil, la deuxième un fil placé dans un tube de quartz communiquant avec un pavillon (l'air emprisonné dans le tube de quartz est porté à haute température et ionisé. La superposition d'un signal audio sur le fil déjà chauffé à blanc produit alors une modulation directe. Comme pour le haut-parleur ionique, le haut-parleur à flamme et le haut-parleur à arc, il n'y a pas de membrane). Le troisième dispositif utilise un fil chauffé, un cristal du genre « Rochelle » et une membrane

combinant deux effets transducteurs. La figure 24 montre une coupe de ces trois appareils. Ils ne sont plus fabriqués de nos jours, sans doute à cause de leur imperfection, et des nombreux problèmes qu'ils créaient. Seule la seconde solution (tube de quartz et air fortement chauffé dans une cavité) pourrait, au prix de quelques améliorations, donner de bons résultats. Ce « Thermophone » est par ailleurs réversible. Mais son utilisation comme microphone introduit un niveau de bruit élevé, dû à l'agitation thermique à l'intérieur du tube de quartz.

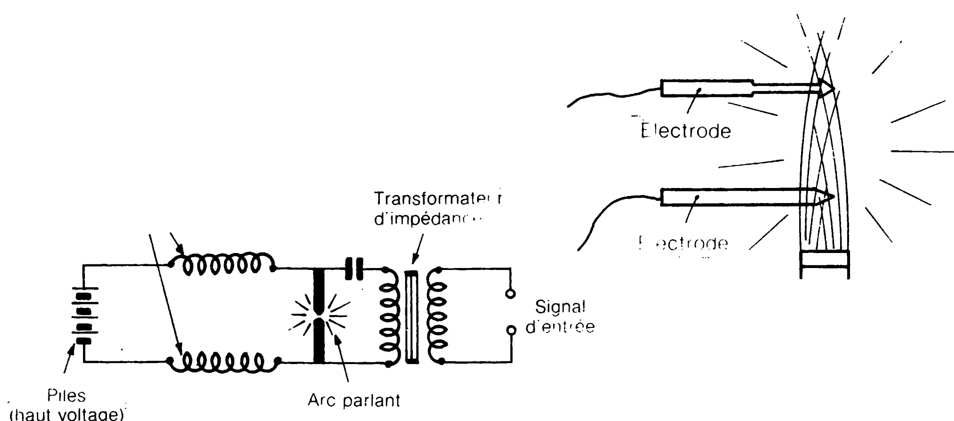



*Fig. 25 : Haut-parleur à arc et haut-parleur à gaz. Il sont tous les deux basés sur la modulation de l'air chauffé ou ionisé. Le haut-parleur à arc (William Duddell, 1935) possède le gros inconvénient d'émettre un bruit de fond important ainsi que des parasites. Le haut-parleur à gaz, plus intéressant et plus simple apporte un bruit de fond moins élevé.*

Les Thermophones sont aujourd'hui encore utilisés comme générateurs de son primaire pour étalonner les microphones. Ils possèdent une cavité étanche et deux feuilles métalliques très minces, chauffées électriquement. La cavité hermétique contient un gaz inerte. Le signal alternatif superposé au courant continu de chauffage, provoque une élévation périodique de la température. Une variation de pression est ainsi engendrée, qui servira à étalonner les microphones. Depuis, d'autres méthodes plus modernes ont été proposées.

6 - Haut-parleur à arc.

Il s'agit ici du fameux « Speaking arc », l'arc parlant. Il fut le premier à ne pas utiliser de membrane ou de partie mobile. La figure 25 montre le schéma d'un tel haut-parleur. Il fut conçu en 1935 par l'anglais William Duddell. Sans doute basé sur le principe de l'émetteur à arc, il utilise un transformateur dont le circuit est accordé à haute fréquence par un circuit L.C. D'un côté une alimentation à piles, de tension élevée, dont chaque polarité est relié à une bobine d'induction. De l'autre, le secondaire du transformateur et le condensateur ne laissant passer que le signal audio. Le son produit est de bonne qualité. Une fois encore le bruit de fond (provoqué par l'arc électrique assombrit le bilan. La solution du haut-parleur à gaz semble plus intéressante. On utilise cette fois comme source de chaleur, un bec bunzen. Celui-ci, bien réglé, peut être silencieux. Dans les deux cas la directivité est excellente.

Beaucoup plus récemment, la firme « Plasmatronic » a proposé aux USA un haut-parleur à plasma ionique. Mais il s'agit déjà là d'un autre principe : le haut-parleur ionique.

7 - Le haut-parleur ionique

Le français Siegfried Klein est l'auteur des prinpales recherches sur le microphone ionique et le tweeter ionique. Il publia dès 1946, dans l'Onde Electrique, les plans d'un appareil capable de moduler directement l'air à partir d'un volume d'air ionisé. Ce fut la base des tweeters et haut-parleurs ioniques de 1950.

Cet appareil travaille selon les variations d'impédance d'un petit volume d'air ionisé. Afin d'augmenter le niveau sonore un pavillon est couplé à ce volume. Travaillant dans un champ de haute fréquence(entre 20 et 30 MHz.) la partie principale de la cellule est faite de quartz, avec une paroi soit simple, soit double. Dans ce dernier cas, un vide sépare les parois.

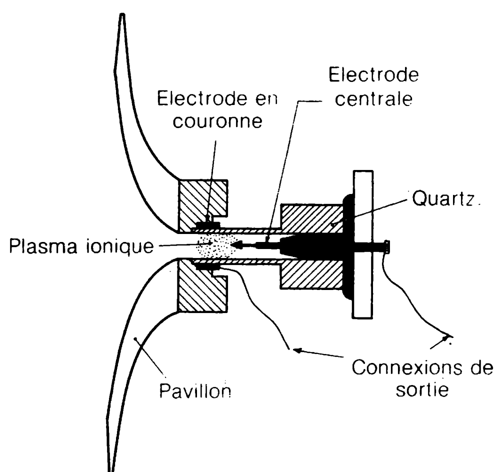



*Fig. 26 : Vue en coupe d'un haut-parleur ionique.*

Le centre possède une électrode en or blanc, platine ou alliage à très haut point de fusion, comme le Kanthal. Sur la figure 26, on peut voir en coupe l'allure de ce haut-parleur. Entre les électrodes, dont une est en couronne, on applique un champ haute fréquence. L'air inclus dans la cellule va s'échauffer et porter à haute température l'électrode centrale.

Cette agitation moléculaire par effet Corona se stabilise après quelques minutes. La modulation d'amplitude superposée peut alors provoquer directement sur l'air chaud une variation de température, donc de pression, à l'intérieur de la cellule. Cette cellule communiquant avec l'air ambiant, il s'ensuit une modulation directe sur l'air ambiant, le signal ayant été auparavant modulé par l'écran d'un tube pentode (schéma sur la figure 27).

Un second schéma, mieux protégé contre les parasites est indiqué sur la figure 28. En effet cet appareil, qui se comporte par ailleurs comme un émetteur, doit être soigneusement blindé. Les montages les plus courants utilisent les pentodes 6 DQ6 ou 6 DQ5. Cependant rien n'interdit d'utiliser un montage transistorisé.

Certaines applications, dans le but d'améliorer la qualité sonore, suppriment le pavillon. Cas, par exemple, du tweeter ionique japonais Realon, dont le rendement est cependant moindre. Cette même firme a également réalisé une cellule démon-

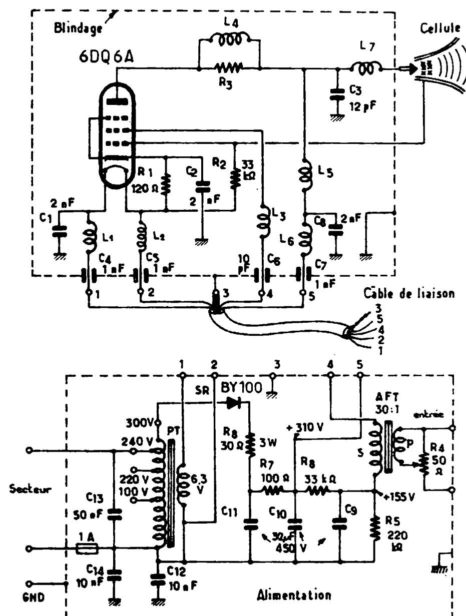



*fig 27 : Schéma d'un circuit de modulation d'un tweeter ionique. Il utilise un tube pentode modulé par son écran.*

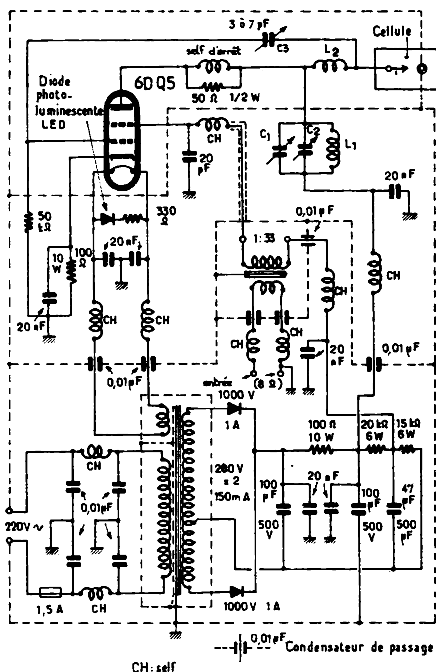
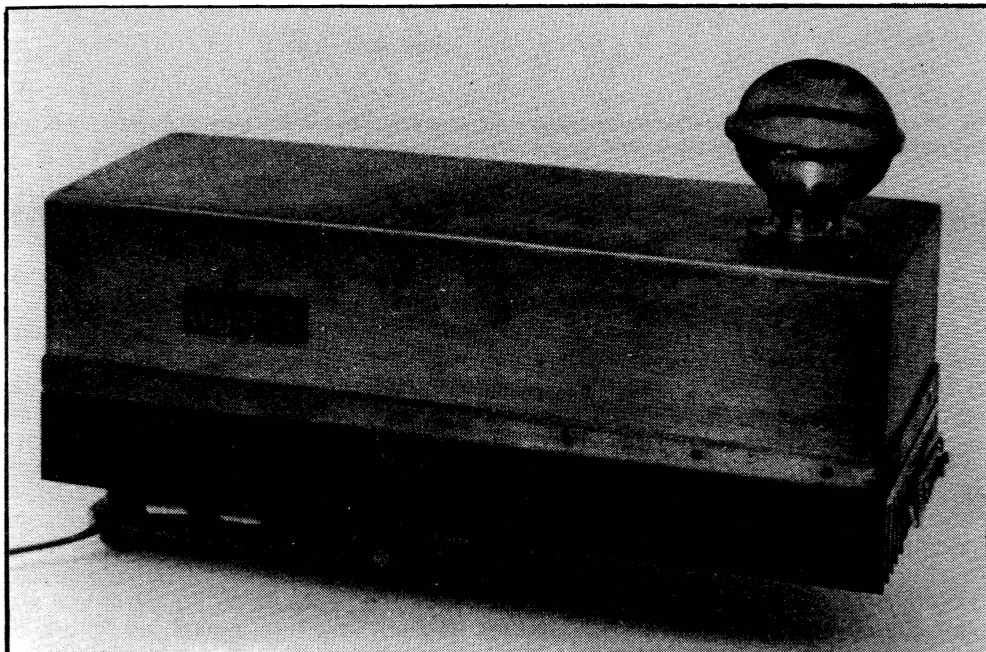



*Fig. 28 : Circuit amélioré pour tweeter ionique. Les nombreux filtres sont destinés à stopper l'émission des parasites gênants pour le voisinage.*

table à fixation par vis ou baïonnette. L'ionisation s'effectue alors dans le volume très réduit d'une couronne de quartz. Cette méthode plus avancée évite la résonance du long tube de quartz traditionnel qui peut, en effet, se situer dans la zone à reproduire.

Ces haut-parleurs sont incapables de descendre très bas en fréquence. Leur limite est d'environ 1 000 Hz. Au-dessous, le rendement baisse très rapidement. Le niveau acoustique maximum disponible devient alors insuffisant. Ceci est dû au volume réduit de la cellule et à l'instabilité de l'ionisation aux fréquences basses et lors de fortes modulations.

Ce type de haut-parleur va donc être reservé à la reproduction des fréquences élevées. Son rendement de l'ordre de 98 dB/m/W est intéressant.



*Tweeter ionique omnidirectionnel récent, conçu par S. Klein en 1979 et proposé sous la marque Magnat. Remarquer l'absence de pavillon. Le circuit est transistorisé.*

Ses défauts sont moindres que ses qualités.

A l'actif une bande passante très large, remarquablement étendue vers le haut du spectre (la figure 28 bis montre la caractéristique niveau/fréquence d'un modèle connu : le Fane Ionofane). La distorsion et la directivité, dépendant du pavillon utilisé, sont en général excellentes.

Au passif, il faut noter des problèmes de fiabilité et de rayonnement. Un blindage soigné peut pratiquement annuler le rayonnement. Des filtres peuvent également être utilisés comme sur le modèle « Realon », commercialisé au Japon. La cellule pose par contre des problèmes de fiabilité. Ses conditions de travail à très haute température affectent notablement sa longévité. Généralement le quartz voit ses pertes diélectriques augmenter pour arriver finalement à la fissuration de la cellule.

L'électrode centrale a également tendance à s'user par évoporation (son extrémité est portée à une température voisine de 1500 °). Le métal évaporé se dépose sur le quartz et accélère alors les pertes.

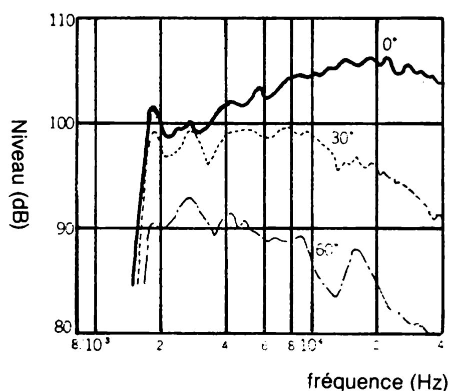



*Fig. 28 bis : Courbe de réponse d'un tweeter ionique des années 60. La réponse s'étendait à plus de 40 kHz et ceci permettait l'utilisation en laboratoire (études sur les ultra-sons).*

Il est donc nécessaire de remplacer fréquemment l'électrode et la cellule de quartz. A noter également le défaut d'un léger dégagement d'ozone.

Le mécanisme, qui est réversible, peut être adapté au microphone (microphone ionique de Klein - Figure 29 - par exemple).

Ce tweeter a un avenir certain. Chaque année de nouveaux modèles sont présentés soit aux U.S.A., soit au Japon, soit en Allemagne...

Une des caractéristiques les plus intéressantes du modèle japonais Realon est son émission omnidirectionnelle due à son absence de pavillon.

Siegfried Klein a également proposé un autre moyen de produire les fréquences aiguës. Ce système, basé sur l'interférence, utilise deux cellules ioniques faces l'une à l'autre, à une certaine distance. Chaque tweeter reçoit sur sa H.F. une modulation audio, mais les deux modulations sont légèrement différentes. Il en résulte un battement audible, émis en un point virtuel situé entre les deux tweeters. Cette méthode intéressante demande des circuits oscillateurs particulièrement stables. Selon Klein, les niveaux acoustiques peuvent être très élevés, de l'ordre de

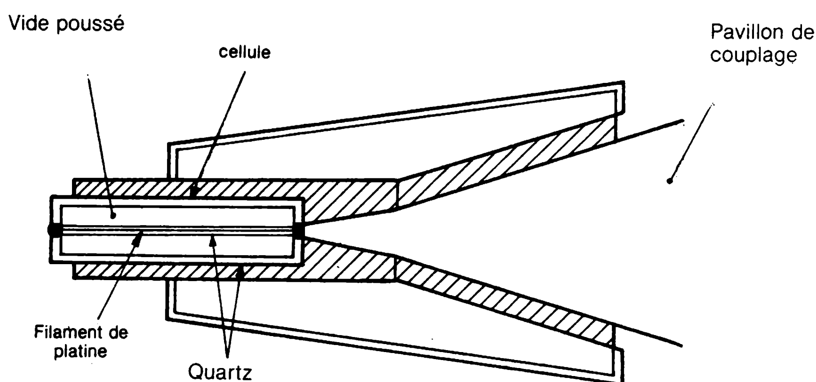



*Fig 29 : Microphone ionique proposé par Klein vers 1950. (D'après Transducteurs électro-acoustiques, R. Léhmann-1963).*

140 dB, ce qui est étonnant. Beaucoup plus compliqué que pour un haut-parleur conventionnel, cette méthode présente néanmoins un intérêt pour diverses recherches scientifiques. Il serait souhaitable que les perfectionnements aboutissent, l'intérêt suscité verrait alors des applications certaines pour la haute fidélité.

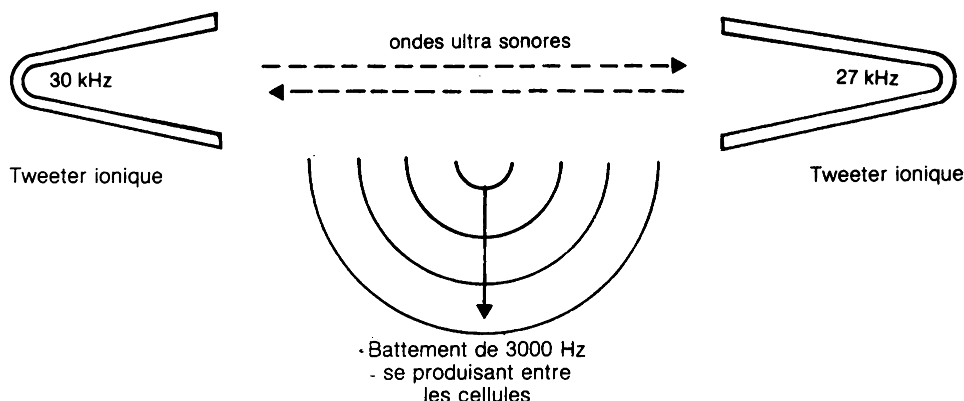



*Fig. 30 : Haut-parleur ionique utilisant le principe du battement. Ce battement audible naît entre les deux cellules placées face à face. (Klein, Revue du Son n°1).*

## Le haut-parleur à ruban

Le haut-parleur à ruban travaille selon un principe identique au haut-parleur électro-dynamique. Le diaphragme et la bobine mobile ne font qu'un. Le ruban est disposé à plat, entre deux pièces polaires ou aimants. Comme le haut-parleur ionique, il est réservé à la reproduction des sons aigus. Ceci en raison d'un ruban de surface rayonnante réduite.

Ce ruban, toujours très léger, est, sauf quelques exceptions sur des modèles récents, très fragile.

La figure 31 montre l'aspect de ce tweeter. Son rendement dépend de la nature de l'aimant utilisé et de la surface du ruban. L'entrefer doit être suffisamment large pour que le ruban puisse y être positionné. C'est son plus gros défaut.

Selon la loi de Fleming (figure 32), le ruban se déplace d'avant en arrière, produi-

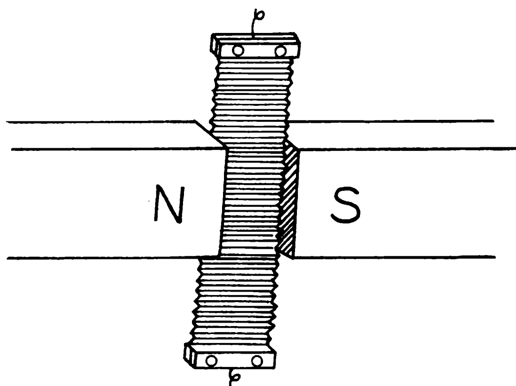



*Fig 31 : Tweeter à ruban, disposition simplifiée du principe mettant en œuvre un ruban gaufré placé dans un entrefer. Reversible, il est aussi utilisé en tant que microphone.*

sant ainsi des sons. Ce système est lui aussi réversible. Les microphones à ruban utilisent exactement le même principe, avec un ruban encore plus léger.

La première application de ce principe était un microphone, appelé « Band Microphon ». Il fut proposé en 1924 par E. Gerlach. Il fut ensuite modifié par W. Schottky, C.A. Hartmann et H.F. Olson.

Ce microphone fut performant dès ses débuts. Le principe, bien que réversible, ne fut appliqué à un tweeter que beaucoup plus tard. Le plus ancien appareil commercialisé est le tweeter Kelly (figure 33), du nom de son réalisateur, Stanley Kelly. Cet appareil a été depuis, plusieurs fois amélioré. Dans sa version la plus récente un pavillon est couplé au ruban afin d'obtenir un meilleur rendement. Sans ce pavillon la perte en niveau acoustique est notable et malgré une qualité de reproduction supérieure, il devient fragile (transitoires, chocs électriques...).

Le ruban, le plus souvent gaufré, car devant être souple pour pouvoir vibrer, était généralement en duralumin. Quelques innovations apparurent vers 1975, au Japon en particulier. La firme Pioneer mit ainsi sur le marché un tweeter de référence PTR 7. Il fut suivi d'un modèle amélioré PTR 7A et d'une version plus économique PTR 5.

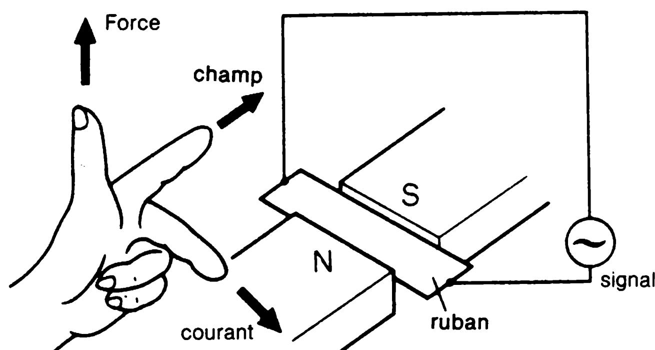



*Fig 32 : Loi de Fleming*

Contrairement aux autres tweeters à ruban, il est fait appel à un alliage plus résistant à la température. Parallèlement, le gaufrage est étendu à toute la surface du ruban. Ce gaufrage est fait non plus simplement en accordéon, mais selon une disposition en forme de nid d'abeille, où les creux alternent avec les reliefs (visible sur la figure 34). A masse égale, le ruban n'est plus souple mais rigide. La suspension est assurée aux deux extrémités par deux fines corrugations. Le ruban ne se déplace donc plus en torsion mais en piston. Sur le modèle PTR 7, l'aimant utilisé était composé d'un alliage au samarium/cobalt, qui permet d'obtenir les aimants les plus puissants. On obtenait ainsi un rendement de l'ordre de 95 dB/m/W sans l'aide de pavillon, et ce avec une puissance admissible de 30 watts. En outre, la bande passante était linéaire, à 2 dB près, jusqu'à 100 kHz. La figure 34 montre un de ces tweeters.

Pour son modèle 10 TH 1000, Technics (Japon) utilise une technologie quelque peu différente. Le choix porte sur une membrane non métallique pouvant résister à une très haute température (300 à 400 ° C). Une piste

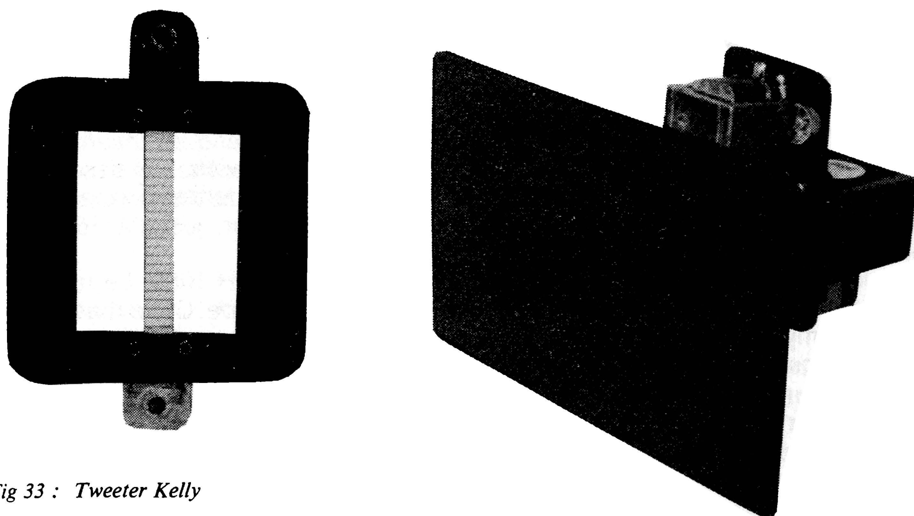


*Fig 33 : Tweeter Kelly*

conductrice y est imprimée à partir d'un métal à haut point de fusion. L'aimant utilisé, de forme tubulaire voit sa paroi épaisse fendue verticalement pour créer l'entrefer nécessaire. On évite ainsi les problèmes de fuite magnétique.

Son rendement est du même ordre que celui du tweeter Pioneer PTR 7, soit environ 95 dB/m/W.

Sa bande passante s'étend aussi, avec une linéarité exemplaire, jusqu'à 100 kHz. La puissance admissible dépasse 50 Watts. Les problèmes de rendement et de fragilité sont donc pratiquement résolus. Il s'agit d'un progrès décisif pour les tweeters à ruban.

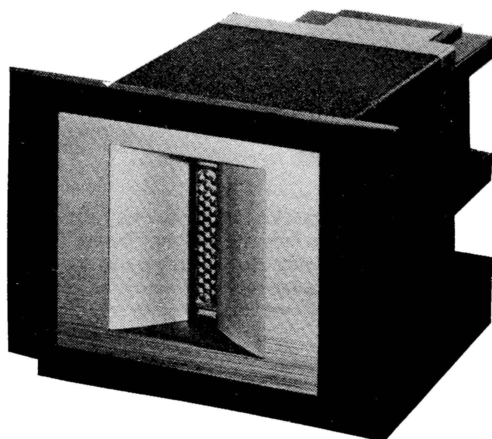


*Fig 34 : Tweeter à ruban d'origine japonaise (Pioneer) utilisant un ruban embossé de façon à obtenir une grande rigidité mécanique malgré la même masse. Il est muni à ses extrémités de deux parties gaufrées (suspensions). Se déplaçant en piston (théoriquement du moins) cet appareil est capable de reproduire la bande 5 kHz - 100 kHz avec une linéarité surprenante. La première version, PTR 7 utilisait un aimant au samarium/colbalt pour améliorer l'amortissement et le rendement, lequel atteint 94 dB/m/W, sans l'aide de pavillon.*

Par ailleurs, la dimension réduite du ruban unique va de pair avec une impédance très basse, de l'ordre de 0,1 Ohm. Un transformateur d'impédance est donc nécessaire. Il peut être soit à deux enroulements, soit à un seul enroulement (autotransformateur). Pour les tweeters à ruban, destinés à la haute fidélité, la qualité du transformateur est primordiale.

Les meilleurs utilisent soit un bobinage complexe en sandwich, soit des tôles de très haute perméabilité. Le faible courant permet d'atteindre de très bonnes performances. Le Pioneer PTR 7 monte, avec son transformateur, jusqu'à 150 kHz à pleine puissance.

Revenons un instant sur le tweeter japonais Technics 10TH 1000. Le ruban est taillé dans un film très résistant à la chaleur, comme le polyimide. Cette matière ressemble à du mylar, qui aurait une couleur jaune transparent. Sur ce film est imprimé ou plutôt déposé, une série de fils conducteurs parallèles. On « allonge » ainsi la longueur utile du ruban. Dans le même temps, on réduit le courant, car l'impédance augmente pour atteindre 8 ohms. Le transformateur d'impédance n'est donc plus nécessaire. Cependant, à cause de la largeur relativement importante de l'entrefer où se déplace ce ruban « multiple », un champ magnétique parfaitement homogène est nécessaire. Le ruban ne pourrait autrement travailler en piston. Pour des raisons de modèles déposés, on ne peut associer à cette technique celle du ruban

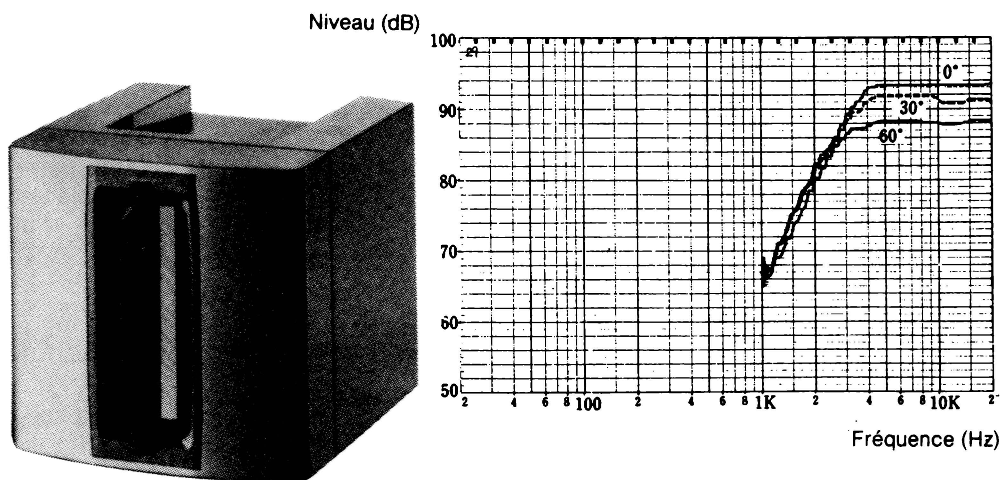



*Fig 35 : Tweeter à ruban japonais (Technics). Contrairement aux autres tweeters de ce genre, le ruban est constitué de multiples conducteurs parallèles imprimés sur un film très résistant à la chaleur, afin d'augmenter la puissance acoustique. Il permet par mise en série de conducteurs (reliés en série extérieurement) de ramener l'impédance nominale à la valeur conventionnelle de 8 ohms. C'est l'un des rares tweeters de ce genre évitant ainsi le conventionnel transformateur d'impédance.*

gaufré, plus rigide. Malgré tout, le tweeter Technics permet, avec cette technologie améliorée du tweeter à ruban, des performances remarquables. Une bande passante de 60 kHz est atteinte et ce avec une linéarité exemplaire (voir figure 35).

Malgré la taille réduite du ruban, son épaisseur très faible va causer quelques problèmes. Même mû par une force égale en tous points de sa surface, il se produit quelques effets de vagues et de fractionnements non contrôlés du ruban. Certains amateurs ont essayé d'amortir le dos du ruban avec une fine couche de graisse de silicone, mais ceci alourdit la masse mobile. On peut cependant arriver à de très bons compromis. Le tweeter à ruban est devenu avec les techniques actuelles un

reproducteur de haute fidélité excellent. La quasi-résolution des problèmes de rendement, fragilité et puissance admissible, ont augmenté la popularité de ce tweeter. Son prix de revient reste cependant élevé à cause de son aimant puissant.

La directivité de ce type de haut-parleur, sans pavillon, est excellente et peu accidentée. Avant de passer au haut-parleur électrodynamique conventionnel, le plus connu, le plus pratique et le plus universel, ouvrons une parenthèse sur un autre type de transducteur : le haut-parleur électrostatique.

## Le haut-parleur électrostatique

### I - Haut-parleur simple effet

Les phénomènes d'attraction dus à l'électricité statique ont toujours existé. Cette attraction est provoquée par la juxtaposition d'une électricité statique positive avec une autre de valeur négative. Cette électricité peut être provoquée par le frottement de deux corps l'un contre l'autre, frottement qui crée, dans un corps neutre auparavent, un déséquilibre d'électrons. C'est le phénomène du peigne, passant dans les cheveux ou du pull de laine que l'on retire et qui provoquent, par frottement, des décharges électrostatiques.

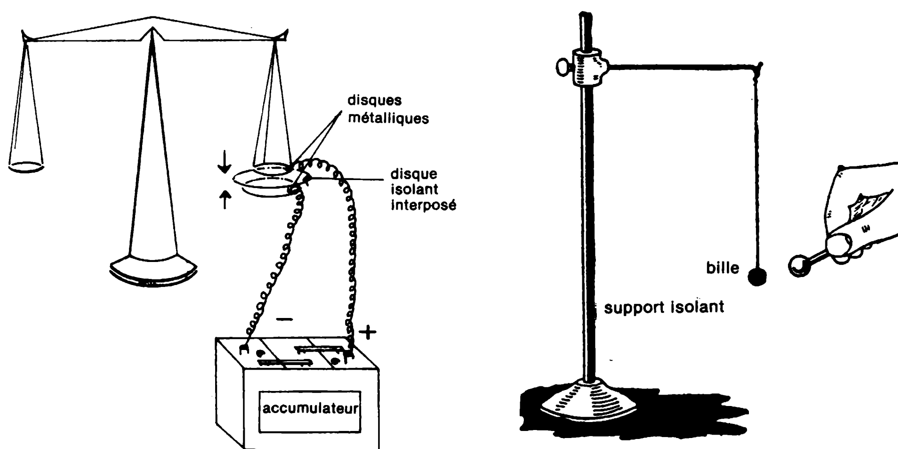



*Fig 36 : Electroscope et balance possédant un des plateaux relié électriquement, mettant en évidence l'attraction par effet électrostatique.*

Il est possible de charger des corps à l'aide d'une polarisation par électricité dynamique. On peut d'ailleurs mettre en évidence cet effet (figure 36). La première expérience de ce genre semble être celle faite vers 1585 par Gilbert devant la reine Elisabeth I d'Angleterre. Il utilisa pour sa démonstration une balance à plateaux. Un des plateaux est remplacé par un disque métallique. Au-dessous est placé un autre disque, isolé du montage. Le disque isolé et le plateau de la balance sont reliés à une « batterie » primitive. Lorsque le circuit n'est pas fermé, la balance est en équilibre. Si l'on ferme ce circuit la balance se déséquilibre, car une attraction se manifeste vers le disque isolé. Ce phénomène est à la base de l'invention du condensateur électrique.

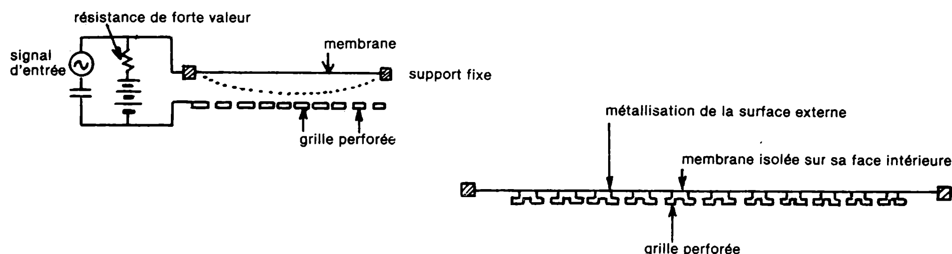



*Fig 37 : Haut-parleur électrostatique à simple effet. Représentation schématique.*

Mettant à profit le mouvement provoqué par cette force d'attraction, on a pu développer le haut-parleur électrostatique. Deux versions existent, l'une dite « simple effet » que l'on va voir ici, l'autre dite push-pull que l'on verra dans le chapitre suivant.

Pour le haut-parleur électrostatique simple effet, les inventions sont plus ou moins simultanées à travers le monde. Il est donc difficile de déterminer qui fut le réel inventeur. Ainsi vers 1927, ce type de haut-parleur, spécialisé dans l'aigu, fut proposé par l'anglais C. Kyle, l'allemand Eugène Reitz, le français André Charlin, le japonais T. Kagéyama. Slepian, Edelman, Kellogg, H. Voigt et quelques allemands des firmes Siemens & Halske , Lorentz firent également des démonstrations d'appareils de ce type.

Ces appareils se présentent schématiquement comme sur la figure 37. Une fine membrane est isolée sur sa face intérieure, conductrice sur sa face extérieure. Elle est tendue sur une plaque ou sur une grille perforée.

Ce genre de haut-parleur nécessite, suivant le principe du déséquilibre des charges indiqué plus haut, une tension de polarisation. Cette tension, plus où moins importante, se situe, pour les haut-parleurs simple effet, entre 250 et 600 V en moyenne. La capacité correspondante est en général assez faible, soit 1 000 à 10 000 pF. Cette valeur va de pair avec une impédance élevée, un transformateur adaptateur d'impédance est donc nécessaire. Son primaire aura la valeur conventionnelle de 4 à 16 Ω, tandis que le secondaire aura une valeur adaptée à la capacité du condensateur équivalent (le plus généralement entre 2 000 et 10 000 Ω). La

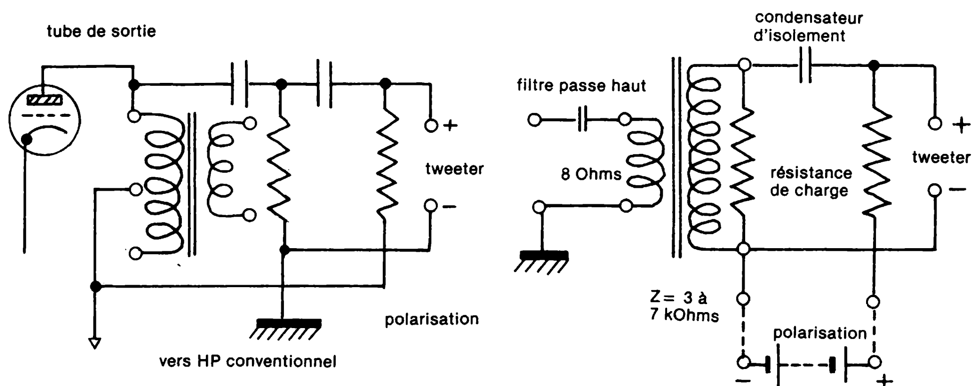



*Fig 38 : Montage courant du haut-parleur électrostatique à simple effet. Noter que sa courbe d'impédance décroissant lorsque la fréquence augmente peut faire chuter légèrement la courbe de réponse de l'amplificateur aux fréquences élevées ce qui est d'ailleurs particulièrement sensible lorsque la cellule est reliée directement au circuit amplificateur, sans transformateur adaptateur.*

figure 38 montre un montage courant du tweeter électrostatique simple effet. On y note la présence d'un condensateur qui isole le secondaire du circuit.

La courbe d'impédance d'un tel haut-parleur est régulièrement descendante en fonction de l'élévation des fréquences. Il s'agit en effet d'un condensateur électrique à armature vibrante.

Ce genre de haut-parleur a été très à la mode aux Etats-unis. Il en existait vers 1959 plus de trente modèles commercialisés. Actuellement ces haut-parleurs sont devenus rares. L'absence de fiabilité et le rendement insuffisant expliquent sans doute cette disparition.

1 - Fiabilité

Le haut-parleur électrostatique à simple effet réunit une électrode fixe - une grille en général - et une membrane. Il doit, malgré une surface émissive assez réduite,

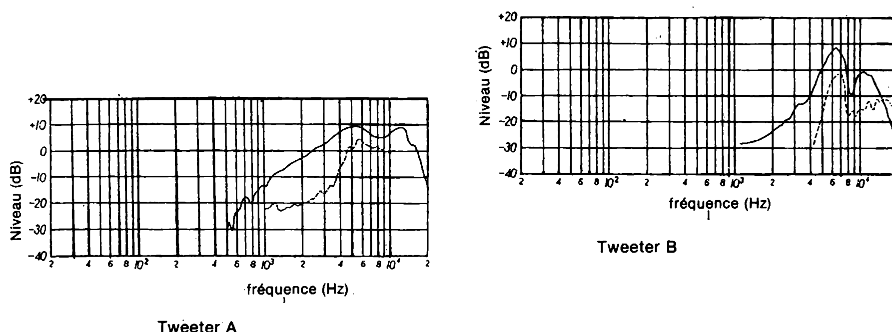



*Fig 39 : Allure générale de la courbe de réponse d'un tweeter électrostatique simple effet. C'est dans presque tous les cas une courbe montante perturbée par une ou deux résonances de cavités.*

posséder une capacité assez importante, de l'ordre de 200 à 5 000 pF. Cela nécessité de réduire fortement l'espace entre les électrodes. Ceci est également nécessaire pour augmenter le rendement, afin de pouvoir travailler avec des tensions de polarisation acceptables (250 à 500 V.). La membrane, dont le dessus est métallisé (ou légèrement conducteur) et le dessous isolé (mylar ou matière similaire) repose sur la grille. Dans presque tous les cas cette grille est légèrement courbée de façon à pouvoir tendre la membrane sans plis. On améliore également ainsi la directivité. Le dos de la fine membrane (20 à 80 microns d'épaisseurs selon les modèles) reposant sur la grille, il va se produire des phénomènes de fuites, de pertes d'isolement entre les armatures.

Une perte importante accroît rapidement la distorsion et réduit la sensibilité. Dans de nombreux cas de tweeters simple effet, la perte provoque en outre un amorçage entre l'armature et la partie conductrice de la membrane. A l'endroit où se produit l'arc, la fine couche métallisée disparaît.

Par ailleurs certains mylars sont sensibles à l'humidité. Ceci est surprenant, mais cette matière, plus poreuse qu'on ne l'imagine, conduit à une perte progressive de l'isolement d'origine. Afin de limiter le courant de polarisation, une résistance de valeur élevée (plus de 1 MΩ) est toujours insérée dans le circuit. Ainsi lorsqu'une fuite a lieu dans la la cellule électro-statique, le très faible courant fera fortement baisser la tension de polarisation. C'est ce qui provoque la perte de sensibilité constatée. Le rendement de ce genre de haut-parleur est en général assez mauvais. Augmenter la capacité du système ou réduire la distance armature/membrane sont des solutions tentantes. La fréquence des pannes va augmenter d'autant.

Il est facile de réaliser que le déplacement de la membrane est très réduit. L'utilisation de ce type de haut-parleur va donc être limitée aux tweeters, ou même à des « super-tweeters », réservés à la reproduction de fréquences très élevées (au dessus de 10 000 Hz). L'allure générale de la courbe de réponse est celle de la figure 39. On y remarque une ou deux fortes résonances provoquées par la présence d'air et de cavités dans le dos de la membrane.

2 - Rendement

Ce type de haut-parleur a la réputation d'un mauvais rendement. A part quelques exceptions (étudiées plus loin), cette réputation est justifiée.

Ce faible rendement pourrait passer pour un défaut inhérent à cette technologie. La réalité doit être plus nuancée.

La figure 40 représente une disposition conventionnelle du dispositif. On y voit l'armature fixe et la membrane isolée sur sa face intérieure.

La grille fixe est perforée sur 30 % de sa surface. En action, la membrane est collée sur l'armature fixe par l'attraction électrosatique. Il n'y a donc plus que 30 % de sa surface qui est active et qui va émettre des vibrations sonores. Malheureusement, les 70 % du reste de la surface, sans aucune utilité, vont également charger le transformateur d'impédance où le circuit de modulation.

3 - Distorsion

Comme le magnétisme, l'attraction suit une loi inversement proportionnelle au carré. Avec une amplitude élevée, la distorsion va donc augmenter rapidement avec le niveau acoustique. Ces défauts sont heureusement moins prononcés si on limite l'utilisation de ce haut-paleur aux tweeters ou « super-tweeters ». Sur la figure 41, on voit que la technologie conventionnelle des armatures augmente encore ce défaut.

Il ne peut donc être utilisé que pour un niveau acoustique donné. Au-delà, il faut

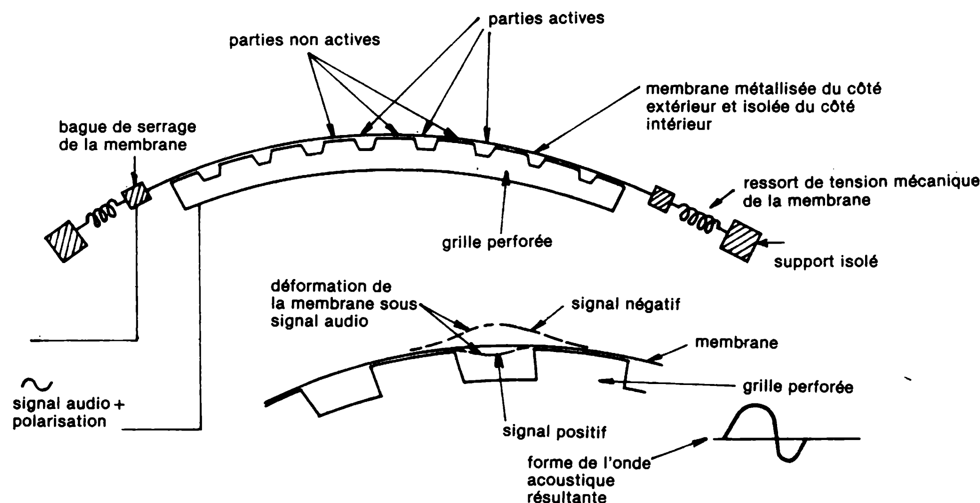



*Fig 40 : Disposition conventionnelle de l'armature et de la membrane d'un tweeter électrostatique à simple effet. On voit que la plus grande partie de la membrane appliquée sur la grille perforée est une partie non active, c'est-à-dire capacitive mais ne travaillant pratiquement pas. C'est une des raisons de la fragilité de ces tweeters (mauvais isolement) et de leur mauvais rendement. En grossissement on voit que la distorsion est accrue en raison de la surface active variant suivant le signal positif ou négatif.*

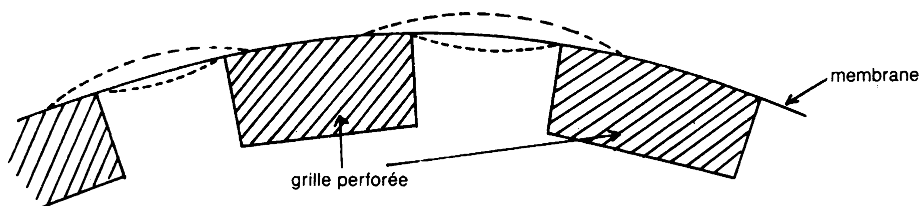



*Fig 41 : Technologie conventionnelle du tweeter à simple effet montrant le gros inconvénient de non linéarité du signal reproduit, dû à une surface active variable en fonction de la polarité du signal.*

s'attendre a une déformation de l'onde reproduite. C'est pour cette raison qu'une méthode classique consistait à associer plusieurs de ces haut-parleurs en parallèle. L'amplitude de fonctionnement de chacune des membranes était ainsi réduite.

Un autre moyen consiste simplement à augmenter la surface active.

A noter que, par rapport au haut-parleur électrostatique push-pull, le haut-parleur simple effet présente le gros avantage de ne pas disposer entre la membrane transductrice et l'auditeur, ni membrane d'isolation anti-humidité, ni grille frontale.

4 - Améliorations possibles

Comme précédemment expliqué, il est possible de réduire le taux de distorsion, si l'on augmente la puissance disponible, donc le rendement.

C'est la technologie mise à profit sur le tweeter japonais « CT 3A » de la firme Sunsey. La figure 42 montre une vue en coupe de l'armature.

L'armature fixe est, comme d'habitude, légèrement courbe. Sa surface est faite de minuscules ondulations. Elle est en outre perforée d'une façon non symétrique par rapport aux ondulations afin de disperser d'éventuelles résonances de cavité.

Comme on peut le voir sur la figure 42, la membrane, tangente aux ondulations, ne repose plus que par des points au lieu de toucher par des grandes surfaces de contact. De ce fait, 95 % de sa surface devient active. Le relief de l'armature permet d'autre part une amplitude de déplacement accrue. On évite ainsi la déformation mécanique (voir figure 41) responsable d'une distorsion évidente. Sur ce tweeter, une membrane de 100 cm² donne un rendement de 100 dB/m/W. L'amélioration est voisine de 18 dB par rapport aux tweeters simple-effet courants. Au-dessus de

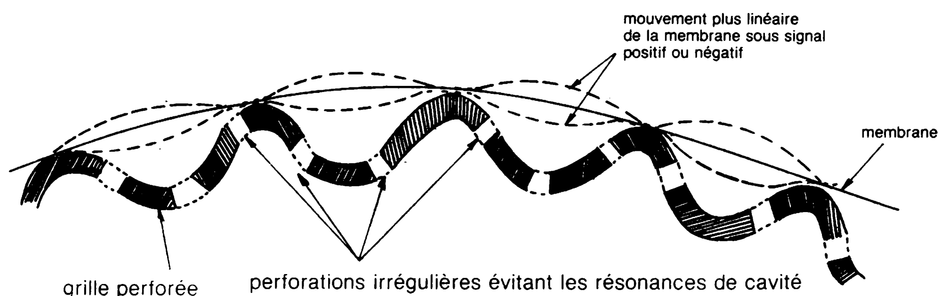



*Fig 42 : Vue en coupe d'un tweeter japonais de haut-rendement. Remarquer le bon dégagement de l'arrière de la membrane, qui permet un mouvement plus linéaire, ceci grâce à l'absence presque totale de parties inactives de la membrane ainsi que des perforations inégales de la grille perforée évitant les résonances de cavités.*

10 kHz, le bon dégagement arrière de l'armature permet d'atteindre une puissance modulée de 50 Watts sans saturation. La distorsion par harmonique 2 devient cependant notable. De conception relativement simple, ce tweeter performant pourrait être perfectionné sur plusieurs points.

Par rapport aux haut-parleurs électro-dynamiques, tous les haut-parleurs électrostatiques présentent une différence importante du point de vue mécano-acoustique : la légèreté relative des armatures fixes par rapport à la masse de la membrane. L'armature fixe, point d'appui servant de référence au déplacement de la membrane, devrait avoir une masse importante. Ce n'est pratiquement jamais le cas. Les armatures fixes, grille perforée ou autres sont souvent très légères. Elles sont, en plus, mal amorties sur le plan acoustique. Il ne faut pas perdre de vue que cette grille, doit en outre, être acoustiquement transparente. A trop travailler la « transparence », on affecte la rigidité mécanique. Dans de nombreux cas, des distorsions dues aux vibrations parasites sont introduites. Cela peut même être ressenti comme une perte subjective de dynamique.

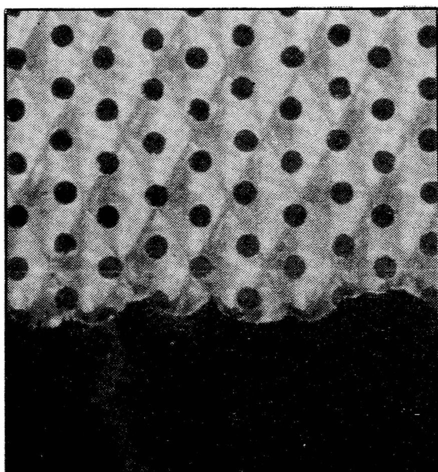


*Fig. 42 bis : Vue grossie de la grille perforée et de la membrane. La partie sombre est celle de la membrane dont le bord de la partie métallisée a été volontairement volatilisé pour éviter l'amorçage.*

Ces transducteurs sont très souvent directifs dans le plan vertical. Horizontalement la forme voûtée de l'armature fixe arrange un peu les choses. Par contre, cette courbure de l'armature fixe introduit un léger déphasage. Ce décalage peut facilement correspondre à la 1/2 longueur d'onde reproduite. Ceci peut d'ailleurs facilement être vérifié par des mesures. Il faut donc trouver un bon compromis courbure/bande de fréquence reproduite/directivité. Ce compromis aura pour but une courbe aussi linéaire que possible.

Dans presque tous les cas, l'augmentation de l'impédance aux fréquences basses et la limite de l'amplitude de déplacement donne une courbe de réponse « montante », voire « très montante » (avec une pente de 12 à 15 dB/octave). Comme ces tweeters ne sont utilisés que pour des fréquences supérieures à 10 kHz, ceci est moins gênant.

Ces tweeters présentent un taux de distorsion élevé mais peu audible. Cette distorsion est, en effet, à dominance de rang pair. Le tweeter push-pull, malgré de nombreux autres avantages, aurait plutôt tendance à supprimer les harmoniques de rang pair.

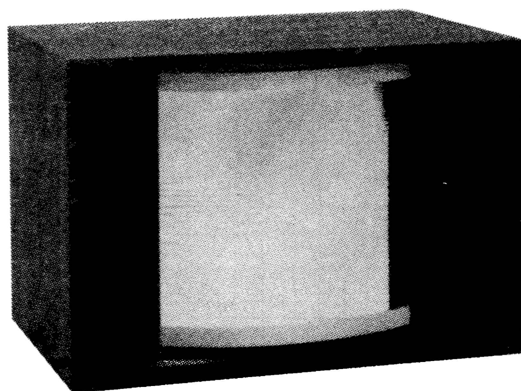


*Fig 43 : Aspect du tweeter électrostatique simple effet décrit sur la fig 42.*

Le haut-parleur électrostatique simple effet reste donc parfaitement utilisable pour le registre aigu et extrême aigu. Des améliorations restent cependant possibles. Remarquons, par exemple, que ces tweeters ont des membranes qui ne travaillent pas en piston, mais en « micro-flexions ». Ceci peut engendrer un bruit de friction qui peut devenir audible, équivalent d'une « coloration » des sons reproduits. Certaines membranes, froissées à la main, très fines, peuvent donner d'excellents résultats. Afin de réduire les résonances, on peut aussi effectuer un vieillissement artificiel ou un traitement à chaud. On obtient ainsi un « gaufrage » microscopique d'un toucher proche du tissus ou de la soie et non plus celui de la cellophane froissée. L'épaisseur de la membrane joue aussi beaucoup sur la qualité subjective. Passé le seuil de 8 microns, la membrane devient beaucoup trop fragile.

La métallisation de la surface extérieure, qui va créer l'armature mobile, joue aussi beaucoup sur la performance subjective. Actuellement on peut remplacer la métallisation par d'autres traitements. Le but est toujours d'obtenir toujours une surface conductrice ou du moins légèrement conductrice. Cette technique est couramment utilisée sur les casques électro-statiques push-pull ainsi que sur les haut-parleurs électrostatiques. Elle présente l'avantage d'éviter l'amorçage, en raison de la résistance importante de la surface conductrice.

On peut également enduire la surface du film isolant d'une huile légèrement conductrice. La plupart de ces huiles, faites d'une base isolante et liquide et d'une fine poudre métallique, ont le défaut de tendre à se dissocier dans le temps. Certaines autres huiles, parfois utilisées pour le traitement antistatique des disques sont beaucoup plus intéressantes. Elles sont naturellement conductrices, donc homogènes et risquent moins de se décomposer. Elles sont soit minérales soit animales, comme certaines graisses de poisson naturellement conductrices. Elles peuvent être diluées.

Pour ces tweeters, comme pour le tweeter à ruban un transformateur d'impédance est nécessaire. Il s'insère entre la cellule transductrice et l'amplificateur.

L'impédance, qui varie avec la fréquence, est en moyenne de l'ordre de 5 à 7 kΩ. Ce transformateur ne passe pas de courant continu et ne demande pas plus une bande passante étendue dans le bas du spectre. Il va pouvoir être facilement fabriqué avec une haute qualité. On peut, bien sûr, utiliser un circuit qui attaquera directement la cellule électrostatique. Ce fut le cas sur quelques appareils du début de la Hi-fi (figure 44). Cette méthode est cependant moins pratique. Plus onéreuse, elle apporte en plus un bruit de fond supplémentaire. Ce défaut sera d'autant plus audi-

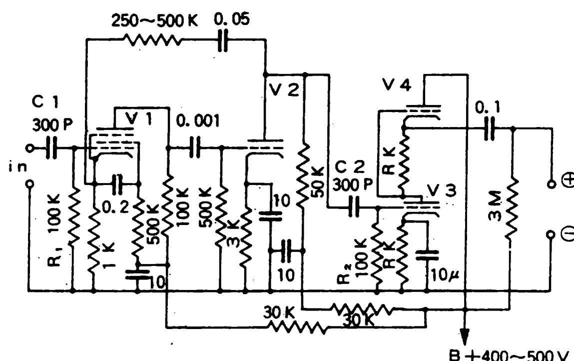



*Fig 44 : Montage à tube attaquant directement une cellule électrostatique simple effet.*

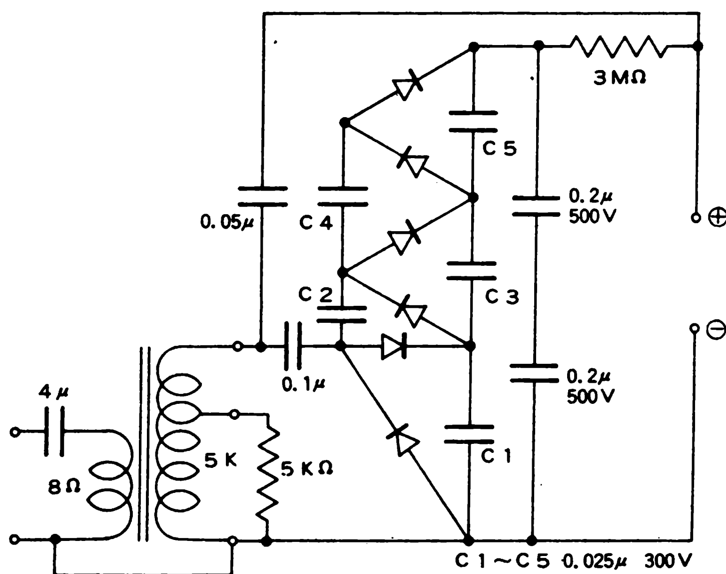



***Fig 45 : Multiplicateur de tension se servant du signal pour générer la tension de polarisation nécéssaire à la cellule. Ce système demande l'usage de condensateur de bonne qualité et a le désavantage de ne pas être très stable.***

ble que le niveau sera élevé et que les sons à reproduire seront dans la zone aiguë et extrême-aiguë. Dans l'état actuel des choses, un montage avec un bon transformateur semble supérieur en tous points pour la reproduction de cette bande.

En ce qui concerne l'alimentation de la polarisation, remarquons que les bornes du condensateur transducteur sont isolées du circuit de masse générale. Ceci se fait par l'intermédiaire du transformateur coupleur, dont seul le point froid du primaire (8 Ohms) est relié à la masse. Par redressement direct du secteur ou à l'aide d'un doubleur de tension, on réalise ainsi une alimentation peu onéreuse, car très simple.

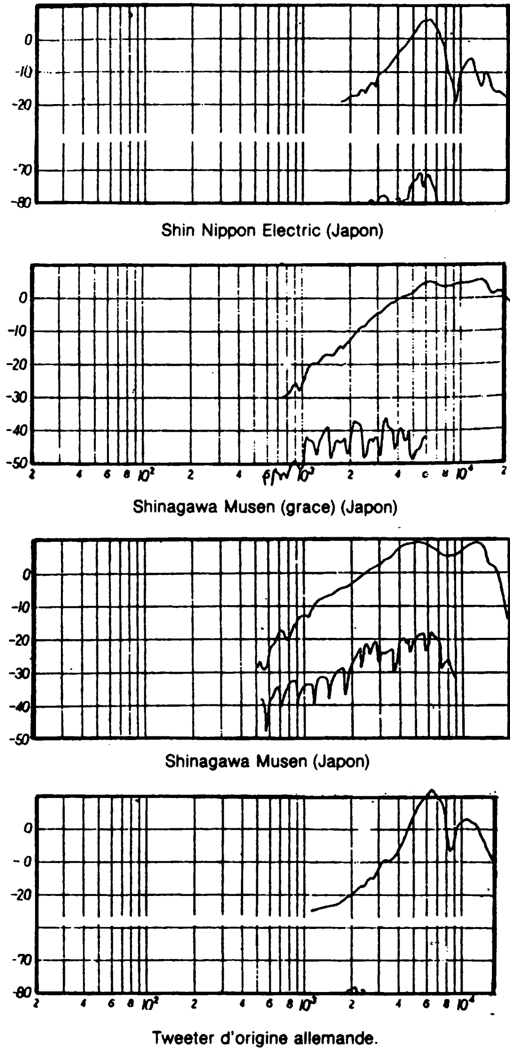



*Fig 46 : Quelques courbes de réponse de tweeters électrostatiques des années 50.*

On peut également obtenir la polarisation par un schéma d'autopolarisation (figure 45). Un multiplicateur de tension se sert alors du signal. Ce moyen a le défaut majeur de ne pas être stable, car il dépend du niveau du signal injecté. Dans ces conditions, il est difficile de stabiliser la tension de polarisation. Il demande aussi, pour réaliser les circuits multiplicateurs de tension, des condensateurs de très haute qualité. Ceux-ci ne doivent présenter que des fuites infimes, sous peine d'un mauvais fonctionnement, compte tenu de la valeur très faible du courant.

Les améliorations possibles porteront surtout sur la fiabilité. La membrane, en particulier, est peu fiable, car tendue et soumise à une tension mécanique permanente. Sur certaines membranes élastiques, les ressorts de tension font parfois s'étirer la membrane. On peut arriver ainsi à couper électriquement la métallisation.

D'autres types vieillissent rapidement, car le contact de l'air ambiant sur leurs deux faces les fait durcir. Le plus simple est de prévoir un remplacement de membrane simple et rapide.

Les progrès incessants dans le domaine des films isolants devraient permettre des perfectionnements prochains de ce type de haut-parleur. Il faudra cependant toujours réaliser un compromis rendement/fiabilité. L'armature fixe devrait être 100 % ajourée pour être 100 % efficace. Dans la pratique, on doit se contenter de perforations et d'une armature fixe en relief. Les cavités ainsi formées peuvent perturber la courbe de réponse. Mais il est possible de jouer sur ces cavités pour régulariser la courbe de réponse en niveau. On essaie simultanément d'arriver au meilleur rendement possible. Ceux qui ont peu l'expérience de ces tweeters peuvent cependant être enthousiasmés par leurs premières écoutes, souvent très concluantes et prometteuses.

Les problèmes arrivent avec quelques mois d'usage. L'isolement électrique qui doit être au moins égal à 4 000 MΩ ne facilite pas les choses. Les tweeters qui donnent les meilleurs résultats sont aussi des condensateurs de qualité (faibles pertes et isolation renforcée). Ces films isolants, les plus prometteurs actuellement, sont du genre « Hostaphan » de la firme allemande Biel. Ils sont à la fois souples, fortement isolants et disponibles dans des épaisseurs variables (3 à 20 microns).

La figure 46 montre quelques courbes de réponse de tweeters de ce genre.

## II - Le haut-parleur électrostatique push-pull

L'idée de réaliser un haut-parleur électrostatique à charge constante, de type push-pull remonte aux environs de 1925. Mais il faudra attendre 1927 pour voir la première réalisation. Cette réalisation, remarquablement bien conçue, fut présentée par son inventeur, l'ingénieur allemand Hans Vogt au Berlin Radio Exhibition

### 1 - Le haut-parleur électrostatique push-pull VOGT

Il se présente sous une forme plate et circulaire, de construction symétrique (figure 47). Ses deux faces sont électriquement isolées. Elles sont liées mécaniquement sur leur périphérie. Chacune de ces armatures est faite de bakélite recouverte de carbone. La protection de la face interne est ensuite assurée par une pellicule isolante à base de nitro-cellulose. Ainsi disposées, ces armatures avaient une tension alternative de rupture de 2 000 Volts. Au-delà, un arc se produisait.

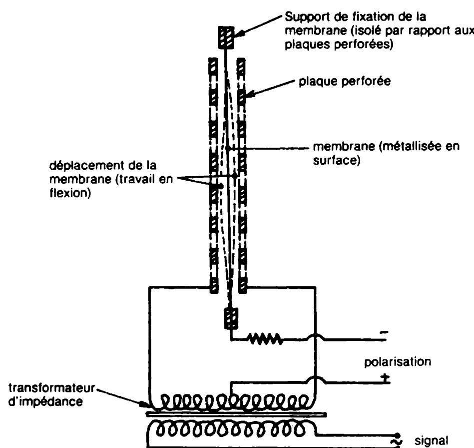



*Fig 48 : Fonctionnement schématique du haut-parleur électrostatique push-pull.*

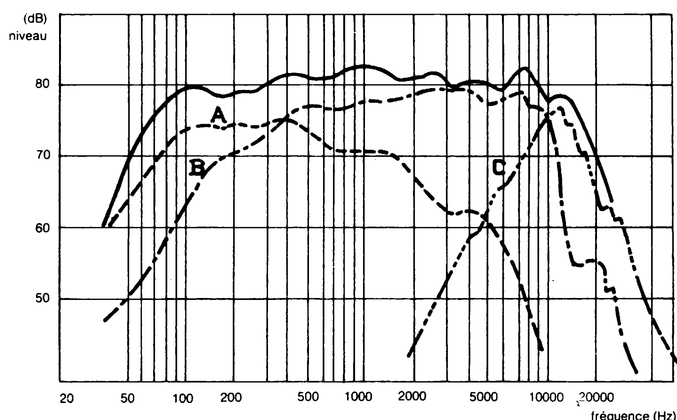



*Fig 49 : Allure de la courbe de réponse du haut-parleur Oszilloplan, en trait plein, comparée à d'autres prototypes de dimensions différente : A, de plus grand diamètre, B de forme rectangulaire et allongée, C de petite surface. On voit que le compromis, en trait plein est remarquablement bon pour l'époque et, à par le rendement, il était difficile de rivaliser une telle performance.*

Ces armatures étaient beaucoup mieux étudiées que ce qui pouvait être rencontré habituellement dans ce domaine. Les fenêtres de la plaque prenaient la forme d'une multitude de couronnes circulaires (figure 47). La face de ces couronnes, tournée vers la membrane, était plate. Ces couronnes étaient par ailleurs plus resserrées vers la périphérie qu'au centre.

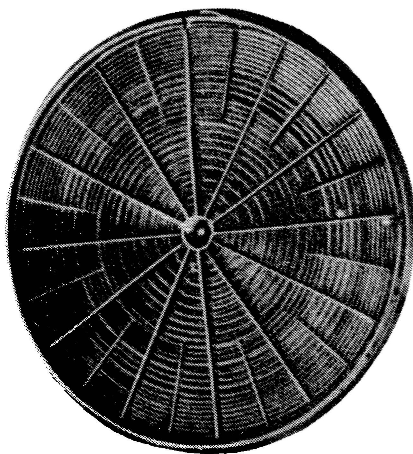
La membrane, du duralumin de 15 microns d'épaisseur, était distante d'environ 2 mm des armatures. Une tension mécanique était appliquée sur la périphérie par une couronne isolante.

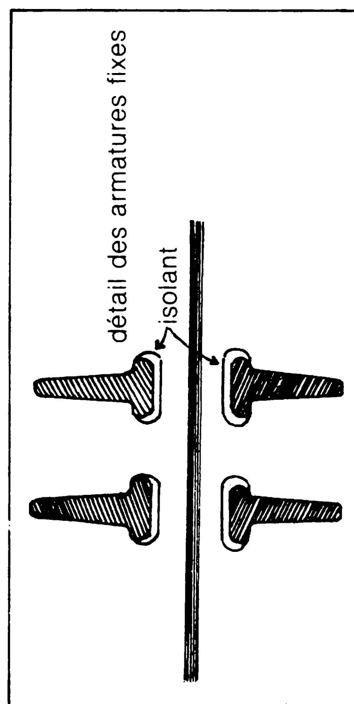
La figure 48 montre le fonctionnement schématique de ce type de haut-parleur. Le signal audio est transmis en basse impédance au primaire d'un transformateur. Grâce à un enroulement secondaire à « point milieu » fortement isolé du primaire, il est transformé en signal push-pull à haute impédance. Une tension de polarisation fixe (valeur : 1 500 volts) est appliquée entre le point milieu secondaire et la membrane. Une résistance de forte valeur a été intercalée afin de réduire les risques d'amorçage.

A l'émission d'un signal, la tension déphasée générée (pouvant dépasser plusieurs centaines de volts) apparaît au secondaire du transformateur. Reliée électriquement, la membrane va quitter sa position de repos et sera attirée vers les armatures. Le signal déphasé appliqué aux armatures va donc se retrancher ou s'ajouter à la tension fixe de polarisation de la membrane. Le déséquilibre de potentiel (baisse d'un côté et simultanément augmentation de l'autre côté) va provoquer l'oscillation de la membrane suivant le signal audio.

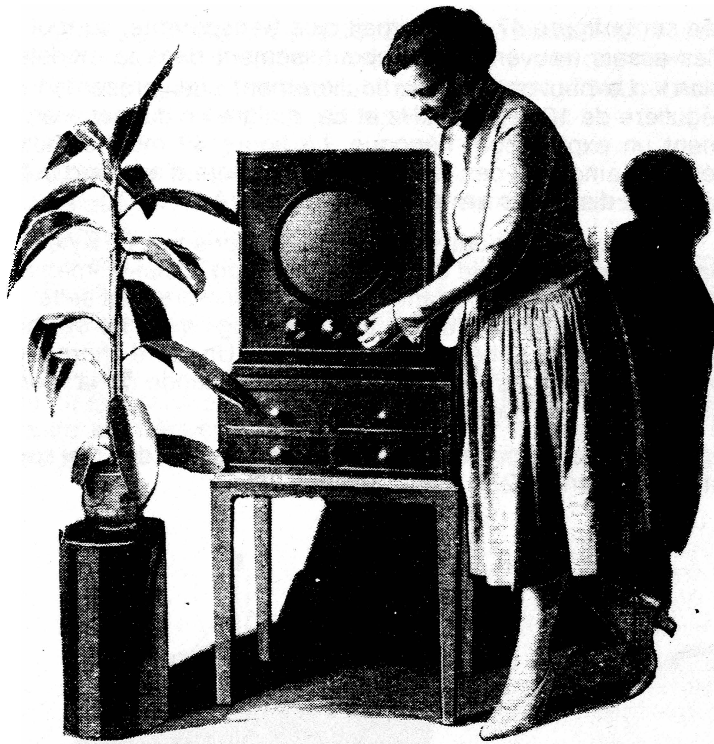
Cette fois encore, la membrane fixée sur son pourtour ne travaille pas en « piston » mais en flexion. Ce type de fonctionnement signifie que l'amplitude de déplacement sera d'autant plus grande que l'on se trouve près du centre. Les armatures du haut-parleur de Vogt étaient le fruit d'études remarquables. Plus espacées au centre qu'à la périphérie, elles permettaient un plus grand déplacement de la membrane avec moins de risques d'amorçage par contact.

Vogt avait également songé aux problèmes de transparence acoustique. Il voulait supprimer la gêne évidente provoquée par l'armature fixe ainsi que par la présence d'une masse d'air entre les armatures et la membrane. Il décida, après maintes mesures et essais de diverses formes d'armatures fixes, d'adopter celle représen-






*Modèle présenté en 1927 à la « Berlin Radio Exhibition ».*



*Modèle commercialisé en 1931. Remarquer la simplification de construction des armatures fixes (plaque perforée).*



*Fig 47 : Haut-parleur électrostatique push-pull de forme circulaire conçu par Hans Vogt en 1931. Remarquer la forme particulièrement étudiée des couronnes formant les armatures fixes, couronnes qui sont irrégulièrement espacées et ont un profil en coupe étudié à la fois pour apporter une excellente capacité active ainsi qu'un bon dégagement de l'onde sonore à travers les armatures fixes. Le centre de la membrane était percé et une pièce isolante traversant de part en part l'épaisseur du transducteur, reliant le centre des armatures fixes évitait les vibrations parasites. Bien que ce soit le premier haut-parleur de ce genre, cé fut un transducteur remarquablement bien étudié. Sa bande passante, détaillée sur la figure 49 et pratiquement linéaire entre 80 Hz et 12 000 Hz était le fruit de recherches fastidieuses concernant la rigidité des armatures, le bon dégagement de l'onde sonore à travers celles-ci, divers perfectionnements qui n'ont malheureusement pas été repris par la suite, sans doute pour une question de prix de revient ou de difficulté de fabrication.*

tée sur la figure 47. Il l'estimait plus transparente, surtout dans sa partie centrale. Ces essais trouvèrent leur aboutissement dans le modèle qu'il nomma « Oszilloplan ». Le haut-parleur, particulièrement plat, présentait une courbe de réponse régulière de 100 Hz à 8 kHz et ce, malgré un diamètre de 38 cm. C'était pratiquement un exploit pour l'époque. La figure 49 montre l'allure de cette courbe de réponse ainsi que des résultats obtenus lors d'essais d'autres membranes, dimensions ou distances armature/membrane (A, B et C).

Les travaux de Vogt furent ensuite repris par C. Kyle (qui avait déjà étudié les haut-parleurs à simple effet) et par Kellogg. Celui-ci imagina d'utiliser une très longue membrane comportant en série de nombreuses selfs, de manière à provoquer une ligne de retard. Il utilisa ainsi les longs murs de certaines salles de spectacle (voir description schématique figure 50). Un autre chercheur, Slepian, se consacra plutôt à étudier les relations entre la résistance de la membrane et le rendement ainsi que la résistance à l'amorçage.

En France, l'ingénieur André Charlin effectua des travaux sur les cellules électrostatiques vers 1927.

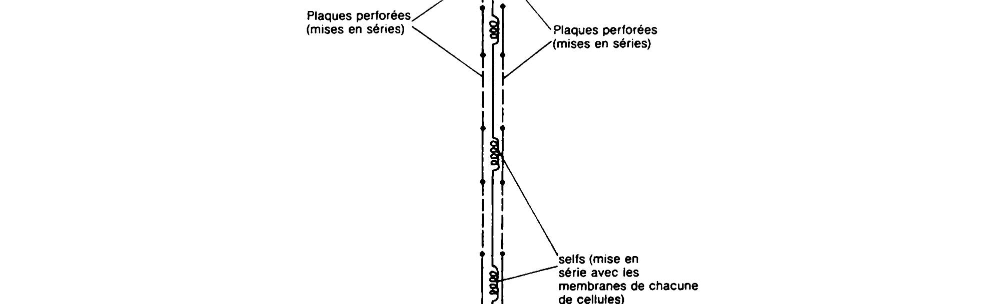



*Fig 50 : Circuit proposé par Kellogg vers 1935, utilisant plusieurs cellules push-pull placées en ligne, dans lesquelles une des armatures (ici la membrane) est reliée en ligne avec les autres par l'intermédiaire de selfs. Ces selfs, sans introduire de modification dans la courbe de réponse forment une ligne de retard et permettent par exemple une application très pratique en salle de spectacle où les grandes dimensions et les échos possibles rendent difficile une bonne sonorisation.*
*Cette idée sera reprise plus tard, mais sans trouver d'application pratique.*

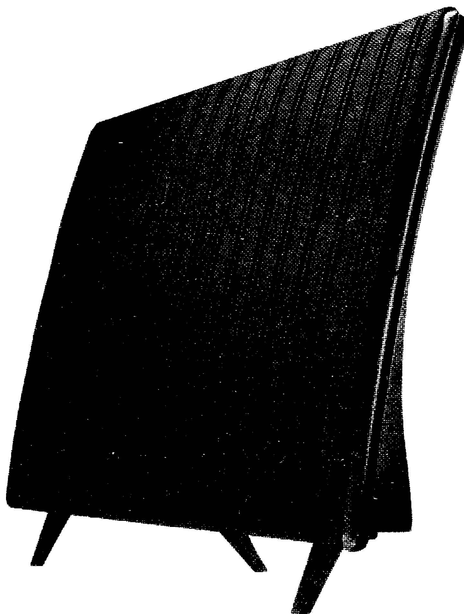
Au Japon, plusieurs ingénieurs étudiaient dès 1932 les travaux de Vogt, Kyle et de bien d'autres. En 1936, N. Hayashi fondait la firme Showa Onkyo et commercialisait des microphones électrostatiques et des cellules push-pull pour haut-parleurs. Cette firme devait s'appeler par la suite STAX (du nom Statics).

## 2 - Le haut-parleur QUAD et ses dérivés.

Le haut-parleur électrostatique push-pull eut un point commun avec le haut-parleur simple-effet : son absence de succès commercial.

Ceci peut s'expliquer par son manque de fiabilité, la nécessité d'adapter l'impédance au moyen d'un transformateur ainsi que la contrainte d'une alimentation extérieure. En plus, son rendement faible créait des difficultés d'adaptation avec les autres haut-parleurs.

Le haut-parleur push-pull était lui-même, jusqu'après la seconde guerre mondiale, soit un instrument de laboratoire, soit un appareil délicat limité à l'aigu. Or, être capable de reproduire les fréquences élevées présentait à cette époque un intérêt très limité compte tenu de la bande passante réduite des appareils enregistreurs d'alors.



*Haut-parleur électrostatique push-pull Quad.*

Malgré tout, on connaissait bien les qualités remarquables de ce transducteur. L'avènement du haut-parleur électrostatique push-pull QUAD constitua à lui seul une révolution dans le monde de la haute fidélité. Il était le premier à offrir, non seulement une bande passante très large, mais également d'autres particularités fort intéressantes.

Les travaux sur les haut-parleurs électrostatiques push-pull avaient sérieusement repris vers 1950. En Angleterre des travaux de grande valeur furent effectués par le fameux D.T.N. Williamson, inventeur connu. Il travaillait pour la société Ferranti, reputée pour la qualité de ses haut-parleurs électrodynamiques.

En 1955 P.J. Walker, de la firme Acoustical, publiait dans les numéros de mai, juin et août de Wireless World une très intéressante étude sur un transducteur électrostatique push-pull à large bande. D.T.N. Williamson avait également participé à cette étude.

Toujours en 1955, P.J. Walker fit une démonstration étonnante devant un public averti réuni à l'hôtel Waldorf de New-York. Son haut-parleur, le premier à large bande de ce genre, reproduisait les fréquences 40 à 14 000 Hz. Il était construit en trois parties. Deux cellules de grave, larges chacune de 12 cm, ainsi qu'une cellule centrale pour le médium aigu, large seulement de 6 cm, se trouvaient réunies dans un grand « panneau » de 1,50 m de haut. Au dos du transducteur avait été fixé un transformateur d'impédance suivi d'un filtre passif. L'alimentation haute tension de la polarisation y prenait place également. La dimension importante de ce panneau était nécessaire pour obtenir un rendement acceptable et une bande passante assez large.

Le fameux haut-parleur Quad fut le fruit des améliorations de ce modèle. Encore commercialisé de nos jours, son succès ne se dément pas après 20 années.

Le haut-parleur Quad travaille selon le même principe que le modèle Vogt décrit précédemment. La seule modification fut une différenciation des cellules en fonction du registre à reproduire. Ainsi six cellules placées de manière symétrique reproduisent le secteur grave. De dimensions 10 cm × 63 cm, un écartement de 3 mm entre les plaques perforées leur permet de reproduire la bande de 40 à 500 Hz. Au centre, deux autres cellules toujours d'une hauteur de 63 cm (mais de 6 cm de large chacune) reproduisent la bande médium (500 à 5 000 Hz). Le tweeter central prend le relais au-delà de 5 000 Hz. La répartition des différentes fréquences est bien entendu confiée au filtre passif. Le profil du haut-parleur Quad est une de ses originalités. Les cellules sont disposées d'une manière légèrement curviligne afin de réduire l'effet directif, caractéristique gênante des transducteurs électrostatiques, tant push-pull que simple effet.

Considérons maintenant la figure 51. Le principe du haut-parleur de Vogt est représenté en (1). Deux plaques perforées sont reliées aux extrémités d'un transformateur déphaseur. Ce secondaire est relié à la membrane de mylar placée entre les

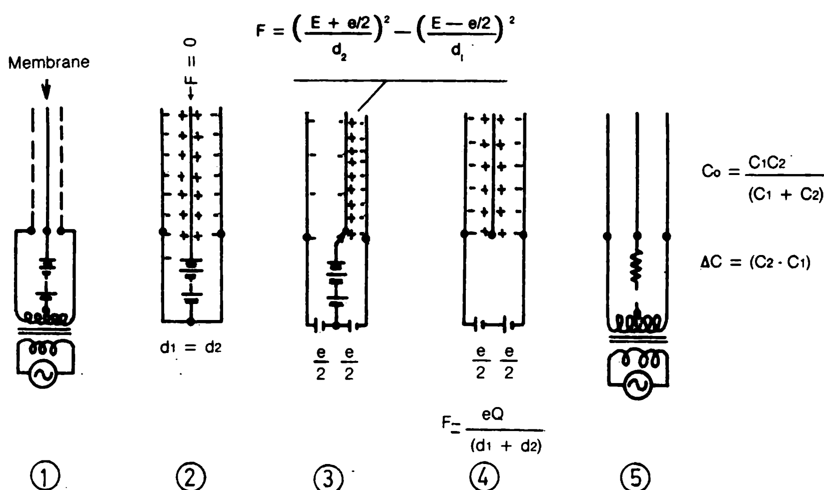



*Fig. 51*

armatures. Le circuit de polarisation E excite les deux faces conductrices de la membrane.

En (2), lorsque le signal est nul, la charge électrostatique Q apparaît aux bornes du double condensateur. Attirée des deux côtés par des forces égales, la membrane garde la même position, devenue instable. Appelons $d_1$ et $d_2$ ces charges équivalentes de la position de repos (sans signal $d_1 = d_2$). Lorsqu'un signal, déphasé par le secondaire du transformateur, est appliqué aux plaques, les charges $d_1$ et $d_2$ se déséquilibrent. Elles vont augmenter d'un côté du condensateur et diminuer de l'autre, leur somme restant égale ((3) de la figure 51).

La force d'attraction entre les membranes et une des plaques perforées est proportionnelle au carré de E/d. On en déduit la force d'attraction résultante, exercée



*Assemblage final des transducteurs.*

sur la membrane. Cette force est égale à la différence des forces d'attraction exercée sur les deux côtés de la membrane, soit :

$$F = \left( \frac{E + e/2}{d_2} \right)^2 - \left( \frac{E - e/2}{d_1} \right)^2$$

Revenons en (2) de la figure 51. Si l'on fait abstraction de la polarisation, on voit que Q reste constant quelle que soit la position de la membrane. En effet, la force d'attraction est proportionnelle selon un facteur Q, à la charge statique :

$$F = eQ/(d_1 + d_2)$$

En fait, la réalité est légèrement différente de cette théorie.

Comme indiqué en (5) de la figure 51 on charge les deux condensateurs à travers une résistance de forte valeur. Ainsi le choix d'une fréquence de résonance la plus basse possible, donne pour la constante de temps formée par l'ensemble CR une valeur Q pratiquement constante. C'est ce qui a donné à ce haut-parleur le nom de charge constante :

$$Q = CE$$

Si C = l/d, d étant de valeur réduite, une augmentation de C se traduira par une baisse de E. Dans le cas de déplacements importants du diaphragme, cette relation protègera, par une baisse de la tension de polarisation E, la cellule contre les amorçages.

D'après P.J. Walker, $f_L$ étant la fréquence de résonance basse déterminée par $R_0$ la cellule possède cet effet d'autoprotection si $C_0$ est plus grand que 1/2 $f_L$. La distorsion s'en trouvera réduite.

L'attraction de la membrane étant unilatérale, connaissant la différence de déséquilibre de C (△ C/C) ainsi que la relation $2\,f\,R_0C_0$ (différence constante de temps/fréquence du signal), il est possible de déduire le taux de distorsion par harmonique 2. Par exemple si $2\,f\,R_0\,C_0 = 1$, C/C = 25 % donnera un taux de distorsion inférieur à 0,5 %.

## Particularité des haut-parleurs push-pull

Dans un haut-parleur de ce genre la surface de la membrane est si importante et son poids si faible, que l'on peut assimiler la charge acoustique à celle de l'air ou presque. Si la seule charge acoustique est celle de l'air, ou presque, il est possible d'augmenter sans inconvénient la surface du transducteur.

La figure 52 montre l'équivalent électrique du haut-parleur électrostatique. ($R_f$ et $M_f$ sont respectivement la résistance acoustique de l'air et sa masse. Z représente l'impédance du baffle et de la charge arrière.

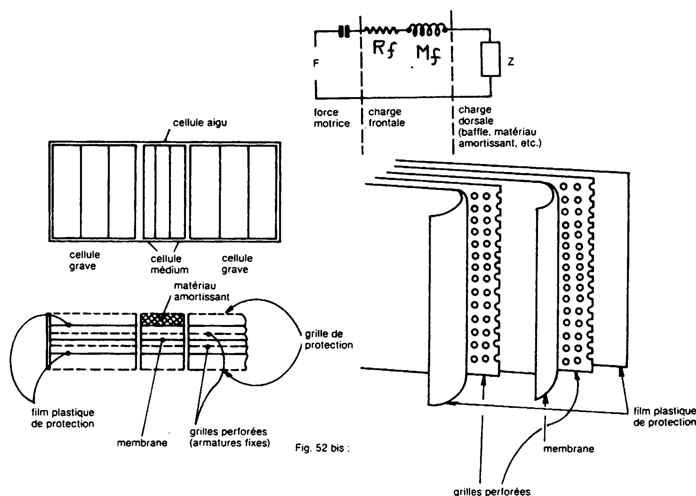
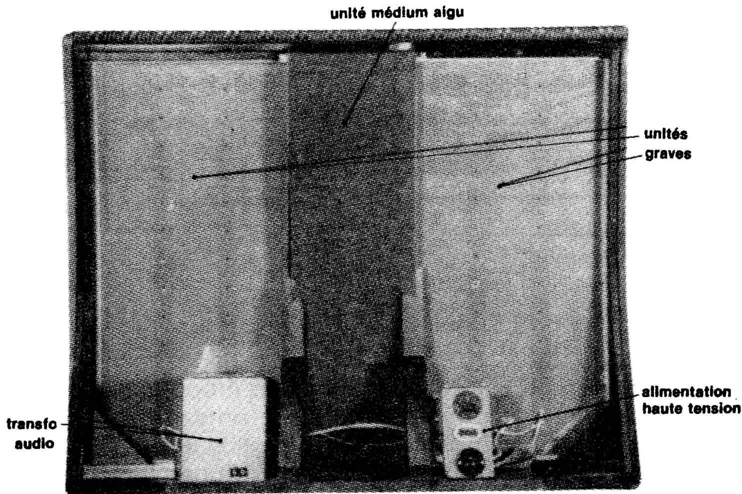



*Fig. 52*

L'avantage du haut-parleur électrostatique par rapport aux haut-parleurs électrodynamiques est sa faible masse mobile. Alors que les premiers sont pénalisés par le poids important du cône, des suspensions et spiders, il ne faut considérer pour les deuxièmes que la rigidité et la souplesse de la membrane. La membrane étant mue en tous ses points par une force égale, il est possible par simple variation des dimensions, d'obtenir la bande désirée, et ce, avec ou sans filtre. C'est le cas de nombreux modèles commercialisés.

Le haut-parleur électrostatique pose néanmoins un problème pour l'amplificateur qui le précède. Sa puissance ne peut plus être exprimée en watts mais en VA, la charge étant capacitive.




Le haut-parleur électrostatique possède une autre particularité. Sur la figure 53 (où d est l'espace entre les armatures fixes, C la capacité et Z l'impédance du système), la courbe en a (en haut du graphe) montre que la réponse dans le grave sera limitée par la rigidité du diaphragme. Si ensuite on double D, C sera réduit de moitié et Z sera doublé. Si la puissance injectée (exprimée en VA) est constante, V sera augmenté selon $\sqrt{2}$. La force d'attraction exercée sur la membrane est proportionnelle à V/D (force d'attraction électrostatique) et la force d'attraction va baisser de $1/\sqrt{2}$ (soit une chute de 3 dB, représentée sur la figure 53 par la courbe b).

En multipliant D par 2 la force d'attraction va baisser. Mais il est possible de diviser par 2 la rigidité de la membrane, ce qui permet de gagner une octave de plus dans le grave.

En multipliant D par 4, on gagne encore une autre octave dans le grave mais avec une nouvelle baisse de rendement de 3 dB.

La même remarque est à faire pour l'aigu. La figure 54 montre que pour C et D constants on agit sur la réponse dans l'aigu en en jouant sur le couplage amplificateur/impédance de sortie (assimilée toutefois ici à une résistance pure). Plus l'impédance est élevée et plus la chute d'impédance est forte du grave vers l'aigu. De même, plus l'impédance est basse et plus un rapport décroissant de la tension de sortie par rapport à la puissance va favoriser la reproduction des sons aigus.

| | D | C | Z | V | V/D |
|---|---|---|---|---|---|
| a | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| b | 2 | 1/2 | 2 | $\sqrt{2}$ | $\sqrt{2}/2$ |
| c | 4 | 1/4 | 4 | 2 | 1/2 |

$P = V^2/Z$

$f_2$ constant

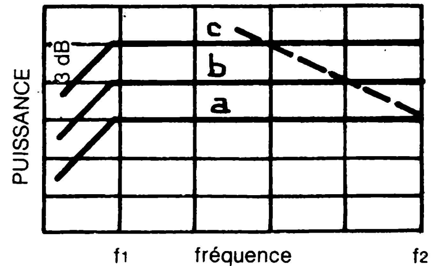



*Fig. 53*

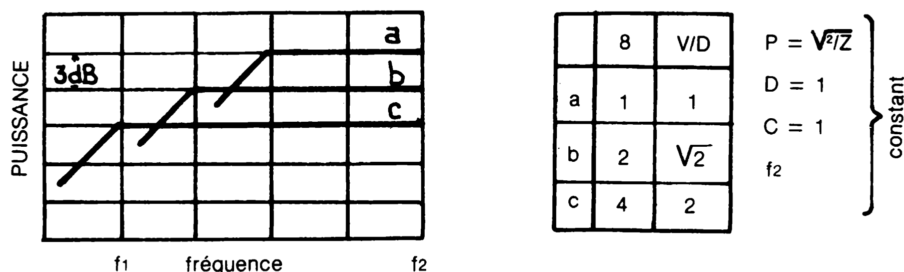



*Fig. 54*

La réponse dans le grave est donc inversement proportionnelle au rendement. Plus on désire descendre en fréquence et plus le rendement sera mauvais. Pour l'aigu, l'amplificateur pose des problèmes d'adaptation. Plus la chute d'impédance sera brusque et plus l'adaptation sera difficile. Pour une seule cellule, il est donc nécessaire de se limiter à 4 ou 5 octaves. Sauf si l'on utilise des technologies particulières et nouvelles basées sur des formes non parallèles (allongées, légèrement trapézoidales par exemple) ou sur un écartement des armartures non constant le long de la cellule.

**Une autre particularité du haut-parleur électrostatique push-pull : la ligne de retard.**

La figure 55 montre une possibilité très intéressante. Kellogg, juste après les travaux de Vogt, avait déjà constitué une ligne de retard. Pour ce faire, il utilisa une succession de selfs et de capacités (les cellules transductrices) et termine ce circuit par une résistance de charge. Cette combinaison, tout en introduisant une distorsion de phase, n'amène pas de perturbation dans la courbe de réponse amplitude/fréquence. Elle permet d'introduire un retard qui peut être mis à profit par un montage similaire à celui de la figure 56.

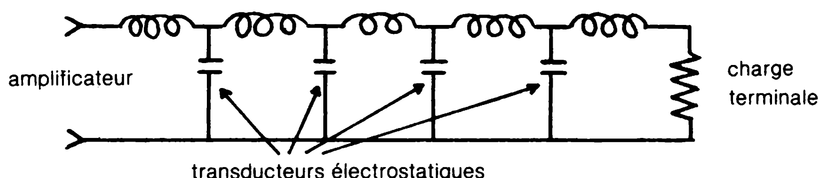



*Fig. 55*

La charge de l'amplificateur devient, pour une bande passante donnée, pratiquement résistive, ce qui est un avantage certain. En outre, on obtient une ligne de retard L/C stéréophonique, qui supprime le « trou central » habituel, et permet une écoute stéréophonique, quelle que soit la place de l'auditeur. Dans ce cas, il faut disposer les cellules transductrices côte à côte sous forme de bandes verticales. Pour une raison pratique, cette technologie n'a pas été appliquée, du moins commercialement parlant.

## A propos du travail en piston

Le haut-parleur électrostatique a toujours été considéré comme travaillant en piston. Ceci n'est pas tout à fait exact. La membrane, bien que plane en position de

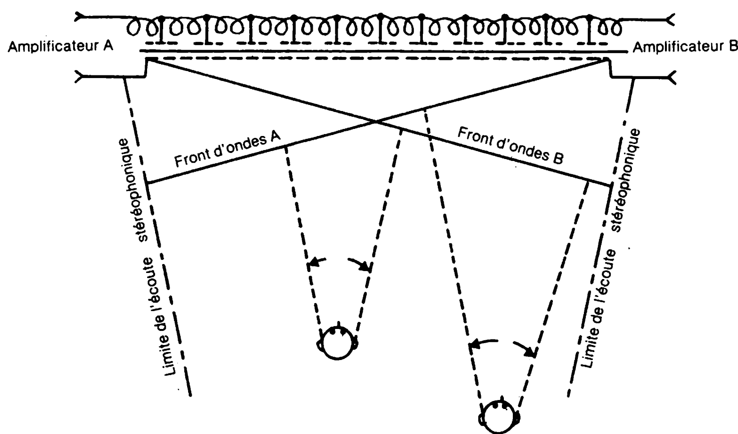



*Fig. 56 : Ecran électrostatique stéréophonique élargissant la position d'écoute en stéréo et évitant l'effet de trou central. C'est un système semblable à la méthode de Kellogg, mais appliqué à la stéréophonie et placé face à l'auditeur.*

repos, est montée sur un cadre fixe. Il s'agit donc en fait d'un déplacement par flexion, selon l'expression anglaise « winding motion ».

De même, dire que la membrane est mue en tous ses points par une force égale en tous ses points, est une approximation. En effet, les plaques étant perforées pour laisser passer les sons, la surface capacitive qui fait face à la membrane n'est plus une plaque entière, mais la plaque moins la surface des perforations. Dans une plaque perforée tendant vers « la transparence acoustique », la surface réelle de la plaque n'est plus que de 30 à 40 % de celle de la surface totale. La membrane n'est donc plus mue que par 30 à 40 % de sa surface. La rigidité mécanique du diaphragme permettant cependant de dire que la membrane est mue sur toute sa surface. Ceci n'est évidemment qu'approché car la rigidité relative est faible compte tenu de l'épaisseur réduite de la membrane (presque toujours inférieure à 10 $\mu$).

## A propos du fractionnement non contrôlé de la membrane.

Ce problème a déjà été évoqué par G.A. Briggs dans son livre passionnant « Les Haut-parleurs ».

La figure 57 montre une photo de la même cellule travaillant à diverses fréquences. Alors qu'à la fréquence de résonance tout semble se passer très bien, il se produit aux fréquences supérieures des ondulations non contrôlées. Elles sont dûes principalement au déplacement transitoire des masses d'air placées à l'avant et à l'arrière du diaphragme ainsi qu'aux masses d'air prises entre la membrane et les plaques perforées. Pour les fréquences élevées la fine membrane, bien que mue sur toute sa surface (sensée travailler en « piston »), n'est plus capable de se déplacer « en bloc », c'est à dire suivant un mouvement en flexion similaire à celui de la fréquence de résonance principale. Il se produit de nombreuses ondulations, des déformations dynamiques de la membrane que l'on a pu mettre en évidence depuis longtemps et que l'on peut encore déceler avec précision grace aux méthodes de

mesure les plus modernes (interféromètre à rayon laser par exemple). Malgré tout, le principe de ce haut-parleur permet d'obtenir un travail en « piston » supérieur à la plus grande majorité des haut-parleurs électro-dynamiques.

Bien qu'aux fréquences élevées le travail en piston est sérieusement altéré, la courbe de réponse peut rester remarquablement linéaire (cas du haut-parleur Quad : figure 58). Il faut souligner, en outre, que la surface émissive étant très importante, le positionnement du microphone de mesure est critique et qu'il ne faut

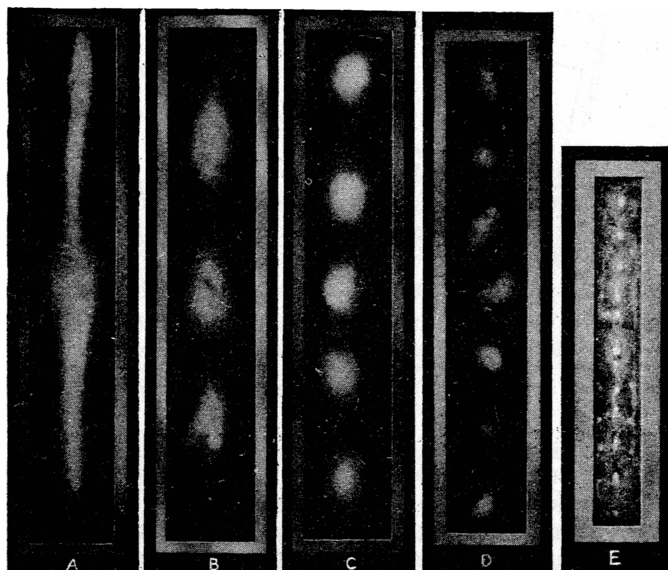



*Fig. 57 : Mise en évidence des résonances de la membrane du haut-parleur électrostatique à diverses fréquences soit A, B, C, et C étant respectivement de 82 Hz, 110 Hz, 145 Hz, 179 Hz et 2780 Hz. On voit qu'au-dessus de 3 kHz le travail en piston devient de plus en plus difficile et exige de travailler sur des membranes de très faible largeur. On peut également utiliser de membranes plus épaisses mais ceci se traduit par une chute dans l'aigu (d'après Haut-parleurs, G.A. Briggs).*

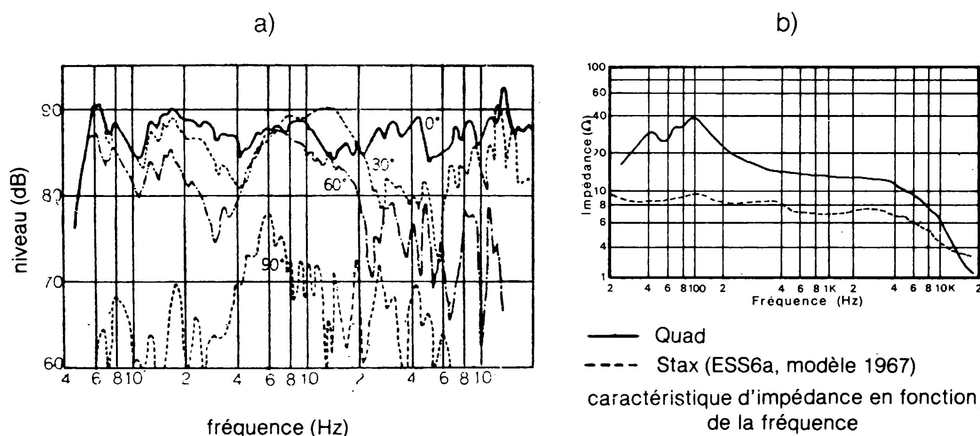



*Fig. 58 : a) :Courbe de réponse du haut-parleur Quad, caractéristique de directivité à 30°, 60° et 90°. b) : courbe d'impédance en fonction de la fréquence.*

Réponse transitoire du haut-parleur Quad.
A - Signal original
B - haut-parleur électrodynamique
C - haut-parleur électrostatique Quad.

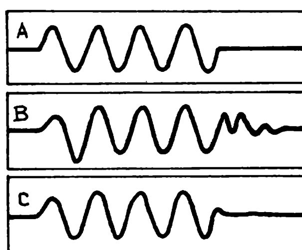



*Fig. 58 bis : Réponse transitoire du haut-parleur Quad*

pas attacher une trop grande importance à l'allure de la courbe de réponse amplitude/fréquence.

### Rendement

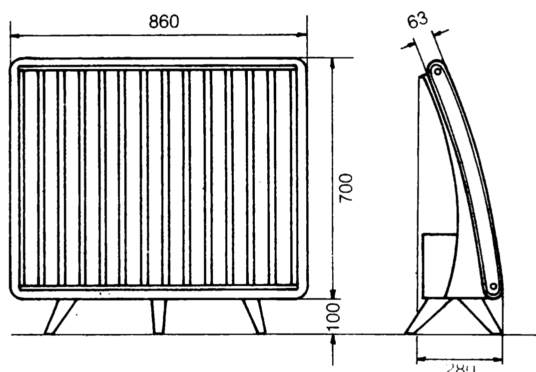
Comme dit précédemment, des combinaisons judicieuses de différentes cellules, permettent de descendre assez bas dans le grave (40 Hz) avec un niveau acoustique intéressant. Dans l'aigu il est possible de monter très haut, au delà des limites audibles. Dans ces limites de bande passante, le rendement est de l'ordre de 86 dB/m/W. Cette valeur est faible, mais équivalente à celle d'enceintes récentes qui utilisent des haut-parleurs électrodynamiques.

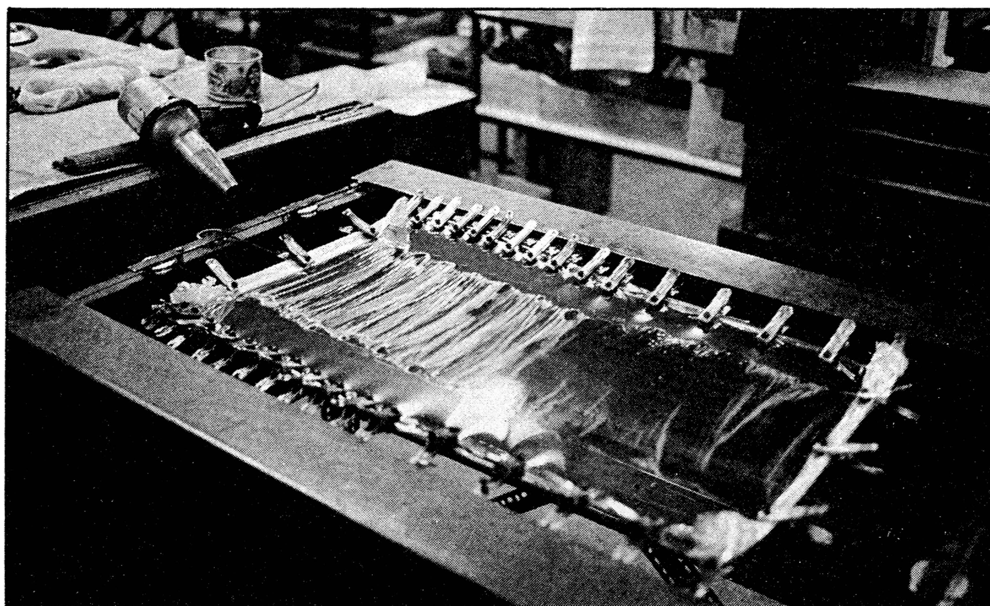
### Niveau acoustique.

Moins élevé que celui obtenu par certaines applications extrêmes des haut-parleurs dynamiques, il permet un niveau important dans le cadre d'une écoute domestique. Certains transducteurs nouveaux utilisent des cellules étanches entièrement remplies de gaz inertes. La suppression du risque d'amorçage permet d'obtenir un niveau acoustique élevé. Le niveau maximum est également fonction de la surface émissive totale et ces transducteurs ont en général une surface importante.

### Rayonnement acoustique

Tous ces haut-parleurs rayonnent en « doublet », par leurs deux faces. On obtient ainsi le diagramme polaire bien connu, en forme de « 8 », à l'exemple des microphones à ruban.





*Opération de tension de la membrane.*

La plupart des systèmes commercialisés est acoustiquement amortie sur la partie dorsale des haut-parleurs . Ceci donne un diagramme de rayonnement qui n'est plus symétrique pour les deux faces. On doit souvent noter pour la partie dorsale du haut-parleur une forte atténuation aux fréquences élevées (dû à un absorbant acoustique tel que la laine de verre) .

Le rayonnement dit en « dipôle » a des avantages, mais également des inconvénients. Comme le prétendait P.J. Walker, le son remplit plus facilement la pièce d'écoute, mais localisation spatiale de l'écoute stéréophonique peut s'en trouver faussée. En général, l'atténuation des fréquences élevées de la partie dorsale du haut-parleur suffit pour donner un résultat valable (les sons graves étant moins directifs). L'acoustique de la pièce reste très importante pour le résultat final. Dans tous les cas ou presque, il est nécessaire d'amortir les surfaces derrière les auditeurs : ceci évite les « retours » indésirables des fréquences élevées.

Dans l'aigu, la directivité est toujours très prononcée (dans le sens vertical comme horizontal). Mais, comme pour le modèle Quad, une forme curviligne permet d'obtenir un bon compromis. Ajoutons que la présence des deux plaques perforées et de la grille protectrice (parfois métallique) peut améliorer les résultats en réduisant l'effet directif dans la zone médium-aigu (effet de diffraction des grilles, que l'on peut assimiler à celui de la « lentille acoustique », un procédé souvent utilisé sur les haut-parleurs à pavillon). Plus critique dans l'aigu, la directivité prononcée n'est pas forcément un inconvénient majeur. La position d'écoute reste encore suffisamment large, à quelques mètres du transducteur, pour ne pas trop gêner l'auditeur. Cet effet directif peut même être avantageux : Il donnera une meilleure définition apparente due au rapport sons directs/sons réverbérés très important.

La dispersion prend l'allure d'un 8 jusqu'à 1 kHz. Au delà, ce 8 se modifie pour former aux fréquences élevées (10 kHz ou plus) de nombreux lobes faisant penser aux pétales d'un chrysanthème ou d'une marguerite. Dans l'extrême aigu, sur des messages stéréophoniques composés par exemple d'un bruit blanc, cela peut se traduire par une succession de baisses et de remontées de niveau lors d'un dépla-

cement latéral de la tête. Mais ce phénomène se produit aussi sur d'autres types de transducteurs.

L'orientation des panneaux électrostatiques est souvent assez critique mais elle permet aussi un choix dans l'équilibre subjectif.

## Sonorité

Le son du haut-parleur électrostatique est d'une grande finesse. Il est également remarquablement fidèle sur presque tout le spectre sonore. Dans la zone aigüe en particulier, le choix de la membrane, de son épaisseur et de ses caractéristiques mécaniques influence beaucoup la personnalité du son. Pour la bande aigüe, et extrême-aigüe, une membrane très fine (de genre Hostophan, d'épaisseurs pouvant atteindre 2,8 microns), peut donner de très bons résultats, mais reste fragile. Il ne faut pas perdre de vue, en effet, que les qualités d'un tel transducteur ne doivent pas êtres acquises au prix d'une baisse de la fiabilité.

Pour l'aigu, des membranes de petites dimensions ou longues et peu larges (3 à 6 cm) sont les plus utilisées.

Dans le grave la rigidité nécessaire du châssis, des plaques perforées vont jouer sur la masse de l'ensemble et influencer notablement le résultat : on oublie trop souvent qu'il s'agit d'un transducteur de faible impédance acoustique, utilisant une grande surface émissive travaillant sur de très faibles déplacements et exigeant en conséquence un chassis de masse élevée, très rigide.

Il est difficile de se prononcer catégoriquement sur la qualité du grave seul. En effet, l'auditeur sera influencé par l'écoute simultanée du médium et de l'aigu. Cette sonorité du grave peut varier d'un constructeur à un autre. Le son obtenu, reconnaissable, n'est pas, d'une manière générale, désagréable. Ce son particulier se reconnait d'autant plus que le niveau est élevé. Il faut penser que ces systèmes travaillent en doublet sur un baffle et non en enceinte close. Ce son se retrouve



*Montage des cellules du haut-parleur Quad.*

d'ailleurs sur d'autres systèmes électrodynamiques à membrane plane. Pour certains, ce son peut paraître « léger ». Ceci est dû à l'effet combiné d'une remarquable réponse transitoire d'une membrane très fine travaillant en doublet et d'une chute rapide dans le sous-grave. De nombreux essais ont été tentés pour coupler le haut-parleur électrostatique avec un haut-parleur de grave. Ce montage est très difficile à réaliser. Les natures des sons sont trop différentes pour que la transition passe inaperçue à l'écoute. Ceci est d'autant plus délicat que, subjectivement parlant, on ne peut réaliser un bon équilibre ni en jouant sur un positionnement donné des transducteurs ni en ajustant un filtre quelconque. Cette mauvaise association pourrait provenir aussi des trop grandes différences du comportement en régime transitoire de chacun de ces transducteurs.

Pour l'utilisation dans le grave, il est parfois avantageux d'utiliser un filtre subsonique coupant les fréquences très basses. Celui-ci, limitant l'amplitude de déplacement de la membrane permettra d'obtenir un niveau acoustique supérieur.

Il est possible de faire une observation curieuse sur les haut-parleurs électrostatiques : une reproduction sonore sera aussi pure, écoutée à plusieurs mètres que l'oreille collée au transducteur. Ceci n'est pas un cas général et certains transducteurs, excellents à plusieurs mètres peuvent devenir franchement mauvais à une dizaine de centimètres. Ce phénomène est mal expliqué. Il est peut être dû à l'effet subjectif d'une membrane de grande surface mue en tous ses points. La supériorité du casque électrostatique sur le casque électrodynamique en découle, puisque la cellule transductrice est alors très près l'oreille.

Il faut se rappeler que, même à 4 ou 5 mètres, cette source ne sera pas aussi ponctuelle qu'un haut-parleur électro-dynamique, malgré la directivité prononcée, en raison de la grande surface émissive. Ceci peut donner une fausse impression de naturel mais accompagné d'un élargissement exagéré de la surface émissive sur, par exemple, une reproduction de voix. L'effet de « mur sonore » donne une spatialisation qui, bien que restant naturelle, « s'étale » sur une trop grande surface. Ce phénomène se rencontre lorsque la surface émissive est trop grande, ou que le nombre des cellules médium-aigu est trop important.

La sonorité peut également être modifiée par l'humidité ambiante. Bien que cette influence soit moindre que dans le cas des haut-parleurs électrodynamiques, elle

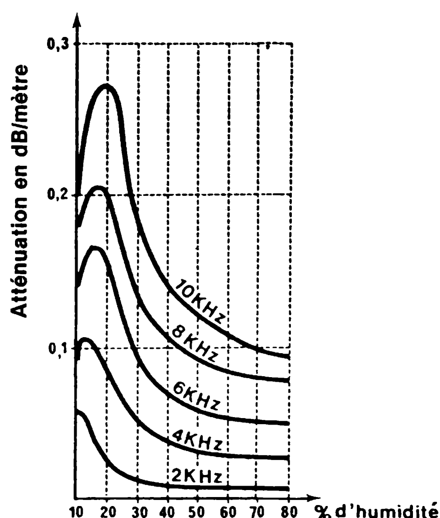



*Fig. 59 : Courbe d'atténuation du son dans l'air en fonction du degré hygrométrique (d'après M. Lamoral).*

peut être perçue, selon la membrane utilisée. Mais, suivant le degré d'hygrométrie, l'atténuation dans l'air lui-même sera à considérer de même que l'influence de la température. La figure 59 donne la courbe de l'atténuation dans l'air en fonction de l'humidité (extraite du livre de Lamoral sur l'acoustique des salles).

On voit que ces courbes ne sont pas régulières. Les variations d'hygrométrie ont également une influence sur les caractéristiques mécaniques de la membrane.

### Humidité et poussière, amorçage

Le haut-parleur électrostatique est sensible à l'humidité en raison de sa résistance d'isolement (plaque/membrane) très élevée.

La plupart des membranes sont soit métallisées en surface, soit enduites d'une fine pellicule conductrice ou légèrement conductrice. De la sorte, la moindre fuite électrique, fût-elle d'une valeur aussi minime que 1 000 MΩ, suffit à faire baisser la tension de polarisation. A des niveaux d'écoute élevés, la saturation peut se produire plus rapidement, ainsi que le risque d'amorçage.

Cet amorçage se produit par ionisation de l'air entre deux points, souvent les parties les plus rapprochées de la membrane en mouvement et des parties saillantes des plaques perforées.

Les plaques perforées sont souvent fabriquées par emboutissage. Elles présentent ainsi, au niveau du bord des perforations, un côté saillant et un côté arrondi. On dispose le plus souvent le côté arrondi vers l'intérieur, ce qui diminue les risques d'amorçage. La structure des armatures fixes est toujours à étudier soigneusement : elle influence les facteurs de niveau acoustique maximum, de rendement, de bande passante, de linéarité, de directivité et de distorsion.

A niveau acoustique élevé, et surtout dans le grave, les cellules sont soumises à de fortes tensions de polarisation. La poussière sera ainsi attirée à la fois par effet électrostatique et par déplacement de l'air. Sur certains haut-parleurs comme le Quad une protection est assurée par une enveloppe étanche autour des transducteurs. Par contre, d'autre modèles, constitués non pas de plaques perforées mais d'un réseau de fines barres parallèles placées très près les une des autres, ne sont pas protégés. Une protection est obligatoire pour les casques électrostatiques pour éviter la destruction rapide des cellules (condensation, forte humidité). Pour le cas particulier des casques, la membrane de protection doit être très fine et acoustiquement inerte. L'épaisseur peut atteindre 6 $\mu$, voir même 2,5 $\mu$ dans les cas extrêmes. Ces membranes sont parfois froissées microscopiquement et peu tendues, ce qui améliore la transparence acoustique.

Dans certains pays d'Europe particulièrement secs, l'enveloppe de protection pourrait paraître inutile, mais la poussière reste un ennemi redoutable. Par contre, dans le grave, une membane de protection trop épaisse ou trop tendue, peut devenir audible à cause de sa masse et d'un effet de cavité cellule/membrane de protection.

### Transformateur de couplage

La nécessité d'un transformateur de couplage est un défaut inhérent au haut-parleur électrostatique. Certains modèles commercialisés en petite série, ainsi que quelques rares amateurs, ont cependant réussis à s'en affranchir.

Un des ces circuits décrit par l'américain C. Mamm vers 1963 est représenté sur la figure 59 bis. Il utilise une sortie push-pull à haute impédance et une tension de plaque très importante. Dans ces conditions les cellules travailleront sans transformateur. Le circuit à tubes est le plus couramment utilisé. Les tubes de sortie (genre tube d'émission) sont adaptés à ce montage et de plus faciles à se procurer.

Le transformateur de couplage, dont le secondaire possède une impédance toujours très élevée (jusqu'à plusieurs dizaines de kΩ pour certaines cellules) est d'une réalisation difficile. Heureusement, un entrefer n'est pas nécessaire. Un couplage très serré entre le primaire et le secondaire est cependant nécessaire afin de préserver les qualités remarquables de ces transducteurs, surtout dans l'aigu.

Un couplage serré est obtenu en superposant alternativement les couches primaires et secondaires par une méthode de sandwichage, limitée cependant par les impératifs d'isolement électrique, à cause des tensions élevées (jusqu'à 5 000 volts dans les cellules de grave). Ceci donne une idée des précautions à prendre lors de l'élaboration du transformateur de couplage. Il faudra choisir avec soin les qualités de papiers isolants (généralement traités à l'époxy), leur caractéristique diélectrique, leur caractéristique d'amorçage pour une épaisseur donnée, ainsi que la valeur d'isolement des fils émaillés. Il n'est pas fait état du vieillissement, qui est un autre problème tout aussi ardu. Heureusement, on peut trouver de bons compromis, surtout pour l'aigu. Les problèmes d'isolement y sont moindres en raison de la polarisation plus basse (800 à 1 200 V en moyenne). Souvent, ces transformateurs sont étanches et montés dans des boîtiers scellés à sorties sur perles de verre.



*Fig. 59 bis : Circuit amplificateur utilisé par l'américain C. Mamm.*

Un amplificateur à couplage direct reste une solution très complexe. Le transformateur demeure une solution acceptable et certaines réalisations sont mêmes remarquables.

Bien que la charge du haut-parleur en question soit capacitive, la caractéristique d'impédance n'est pas aussi régulière que celle d'un condensateur. Sur la figure 58 (b) sont tracées les courbes d'impédance de deux modèles conventionnels.
On voit que la chute d'impédance est importante en dessous de 40 Hz. Cette chute est sans doute due à la variation brutale d'inductance du transformateur de couplage, se manifestant e à ces fréquences.

Revenons sur l'amplificateur push-pull à couplage direct. Sa réalisation est difficile et il demande l'usage de condensateurs spéciaux à la fois fortement isolés et de bonne qualité. Pour la section aiguë, il se posera aussi un problème de souffle qui n'existe pas sur le transformateur.

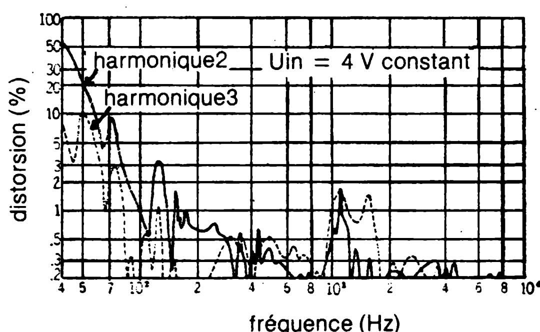



*Fig. 60 : Caractéristique de distorsion en fonction de la fréquence du haut-parleur Quad pour une tension constante d'entrée de 4 V.*

## Distorsion

La figure 60 montre le taux de distorsion du haut-parleur Quad. Celui-ci, très faible, monte rapidement dans le grave : pour une tension de 4 Volts en entrée le taux de distorsion atteint 20 à 50 %. Heureusement ce taux est composé, en majeure partie, d'harmoniques de rang 2, peu perceptibles à l'écoute de cette zone.

Le taux moyen de distorsion du haut-parleur électrostatique push-pull est inférieur à celui des modèles « simple effet ».

Cependant, sur ces derniers, il n'est pratiquement composé que d'harmoniques pairs dont un harmonique 2 prédominant. Sur le haut-parleur push-pull, au contraire, les harmoniques pairs, en raison du principe utilisé, seront fortement réduits. En pratique le résultat est différent et un harmonique 3 se mélange à l'harmonique 2. Pour les sons aigus il est malgré tout préférable d'avoir un taux de distorsion non seulement bas, mais également composé, soit d'un dégradé régulier d'harmoniques, soit d'une légère prédominance paire. Une prédominance d'harmonique 3, même à taux réduit donnera un son « acide » ou « dur ». En fait, l'élément push-pull, si le choix des éléments (membrane/géométrie des armatures fixes, transformateur de couplage, filtre passif...) est bien fait, peut donner d'excellents résultats.

Le taux de distorsion est situé en moyenne très bas et la linéarité est souvent remarquable sinon exceptionnelle. Pour les fréquences supérieures à 10 kHz, le taux de distorsion mesuré depend aussi de la bande passante dans l'aigu du transducteur : Pour mesurer efficacement le taux d'harmoniques 2 et 3 à la fréquence de 15 kHz par exemple, la bande passante devrait être d'au moins 45 kHz.

## Possibilités d'avenir

De nombreuses améliorations pour ce transducteur sont possibles.Elles concernent surtout la membrane et sa stabilité mécanique dans le temps. En ce qui concerne les plaques, de nombreuses combinaisons et formes sont possible. Il est d'ailleurs curieux de voir que la géométrie du premier haut-parleur de ce genre, celui de Vogt, n'a été ni étudiée ni reprise par la suite. Il reste sans doute un sérieux travail à faire du côté des écoulements d'air à travers les armatures. La rigidité mécanique des armatures est également perfectible (rares sont celles qui sont totalement inertes acoustiquement).

Pour le transformateur les progrès porteront sur les matériaux constituants les tôles et surtout sur les diélectriques.

Beaucoup d'autres idées ont vu le jour pour la géométrie des électrodes et la forme de la cellule. De nombreux brevets d'invention ont été déposés, basés sur le principe push-pull. Encore non appliqués, ils concernent des membranes doubles, des cellules doubles ou des membranes à métallisation en double spirale (pour application d'asservissement). Comme pour le haut-parleur électrodynamique, il existe de nombreuses possibilités d'avenir. Si l'on met à part le transformateur, le prix de revient d'un tel transducteur, une fois lancée la production de grande série, reste du même ordre, voire inférieur à celui des haut-parleurs traditionels (dont les aimants volumineux sont de plus en plus coûteux). Ces derniers nécessitent de plus une enceinte, elle aussi coûteuse. Du point de vue mécanique, sur de nombreux HP électrostatiques, le rapport surface de membrane/masse des partie fixes (armatu-

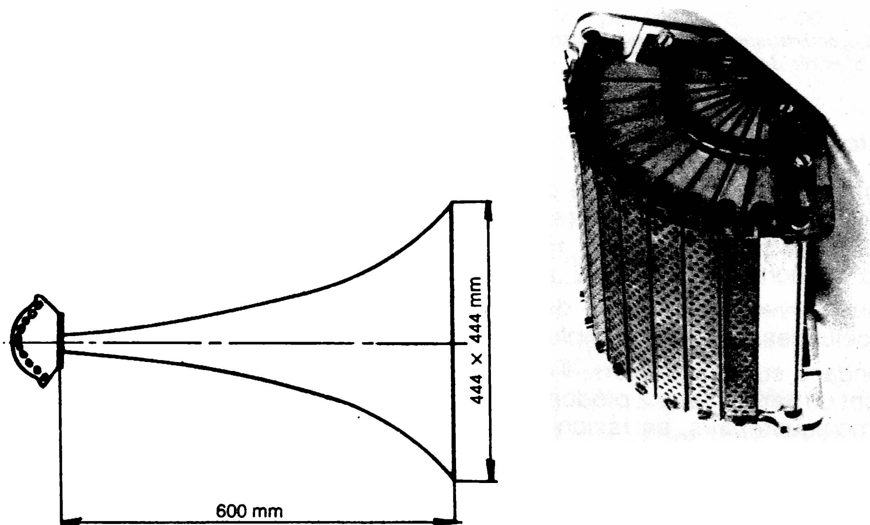



*Fig. 61 : Chambre de compression électrostatique expérimentale proposée par J. Merhaut vers 1965 et publié dans le journal de l'AES en 1968. Les performances étaient tout à fait remarquables car la linéarité de l'ensemble était parfaite entre 300 et 15 000 Hz.*

res fixes, cadres etc...) semble insuffisant. Il ne faut pas oublier que les parties qui doivent impérativement être massives et inertes ne sont pas que le cadre formant baffle, mais aussi les plaques perforées. Ces plaques sont en général perforées par une méthode de poinçonnage, procédé facile et peu coûteux. Un modèle plus évolué devrait avoir des plaques entièrement moulées, assez épaisses mais dont les perforations permettraient un bon dégagement acoustique. Un traitement amortissant de ces plaques (ou un sandwich de deux plaques autour d'un matériau amortissant) permettrait de réaliser des éléctrodes que l'on pourrait vraiment appeler « fixes ». Il est facile, en effet, sur de nombreux panneaux électrostatiques, de mettre en évidence les vibrations des plaques lors d'un signal. Il existe même des cas où l'on peut entendre un son, faible il est vrai, mais audible, en l'absence de ... membrane.

Certains, pour améliorer le rendement, ont tenté de coupler le haut-parleur électrostatique à un pavillon. De tels essais ont été effectués vers 1965 par N. Hayashi (Stax Products) au Japon et par Joseph Merhaut à Prague. Ce dernier avait présenté dans le cadre de l'A.E.S. un haut-parleur push-pull à 9 cellules coupé à un pavillon exponentiel (figure 61). Cette réalisation était remarquablement linéaire entre

*Fig. 61 bis : Haut-parleur électrostatique américain, de marque Beveridge. Remarquer la forme curieuse du pavillon diffuseur.*

300 Hz et 15 000 Hz. Quant au pavillon réalisé par N. Hayashi, de grande taille, en bois et aux parois sablées, sa fréquence de coupure était de 80 Hz. Il prenait un volume important et était donc peu pratique. Mais la valeur importante de la charge acoustique et la friction de l'air à l'intérieur du pavillon empêchait la fine membrane, mue par une force électrostatique trop faible, de donner les résultats escomptés. En plus, le pavillon ne chargeait le haut-parleur que d'un côté de la membrane. Soucieux de cette question, N. Hayashi avait de ce fait réalisé un système à double pavillon, c'est à dire utilisant deux pavillons identiques chargeant la membrane sur ses deux faces.

Mais là aussi les résultats étaient assez décevants et tout à fait inapplicables à une production commerciale, même de petite série.

*Fig. 61 bis : Circuit de l'amplificateur Beveridge adapté aux cellules Beveridge. Remarquer le montage hybride transistors/tubes et l'étage de sortie très curieux. Quelques corrections de la courbe de réponse sont introduites dans les étages d'entrée.*

Par contre, la méthode de la « lentille acoustique », telle qu'appliquée sur le haut-parleur Beveridge est très intéressante. Cette réalisation de haut de gamme, sans transformateur, possède un amplificateur incorporé. Si la lentille ne peut améliorer la linéarité de phase, elle pourra par contre fortement élargir le diagramme polaire de directivité. Ceci se traduira par un son moins « projeté », caractéristique des haut-parleurs très directifs. La figure 61 bis montre l'aspect de ce haut-parleur fort curieux. Comme on le voit, ni les idées ni les possibilités d'amélioration ne font défaut.

Enfin, à propos de la disposition de la membrane dans l'élément push-pull, il est possible de disposer celle-ci comme sur le « transformateur acoustique » du Docteur Heil. Cette disposition, en accordéon entre des armatures fixes, a donné de bons résultats mais n'a jamais été commercialisée. Par ailleurs, des membranes sphériques ou en portion de sphère, semblent difficilement réalisables. Ces formes ont cependant été appliquées au japon vers 1955 sur des transducteurs simple effet. La membrane posait, comme on s'en doute, de grosses difficultés de réalisation (tension mécanique sur l'armature fixe, moulage de celle-ci etc.).

Concernant la métallisation, les tentatives d'asservissement utiliseront soit des spirales doubles, soit une métallisation sur les deux faces de la membrane : un des deux conducteurs servira à réinjecter un signal dans le circuit d'asservissement. On peut ainsi imaginer un système mixte (électrostatique + électrodynamique à membrane plane). Sur les armatures, une série d'aimants fixes, combinée avec une piste conductrice sur la membrane, utiliserait le principe parfaitement réversible du haut-parleur électrodynamique à membrane plane.

Ces divers systèmes seront surtout intéressants pour le secteur grave. La membrane y est mue en tous ses points, et l'asservissement étant réalisé en tous les points de la membrane, il est possible d'envisager un travail de cette membrane en parfait piston. Il s'agit là d'un très net avantage par rapport à un asservissement sur le haut-parleur électrodynamique, où le contrôle ne se fera qu'au niveau de la bobine mobile et non sur la surface émissive toute entière.

## Les haut-parleurs électrodynamiques plans.

La véritable révolution dans la conception du haut-parleur sera apportée par Chester W. Rice et Edward W. Kellogg vers 1925 (invention qui sera traitée dans un chapitre séparé). Mais d'ore et déjà l'idée d'utiliser une membrane plane et de remplacer la bobine mobile cylindrique par une série de rubans disposés en méandres, remonte très loin. D'autres tentatives avaient aussi porté sur des bobine rectangulaires ou disposées en zig-zag.

## Le haut-parleur Riffel

Ce haut-parleur travaille selon le principe du haut-parleur à ruban, décrit précédemment. Le ruban ne se sert pas ici de sa propre surface comme membrane émissive. Dans le haut-parleur à ruban, le ruban est mu sur toute sa surface et sa position à plat dans l'entrefer donne une surface conductrice égale à la surface rayonnante. Dans le cas présent, le ruban est placé verticalement. Cette position offre à la fois un avantage et un inconvénient. L'avantage principal est un rendement amélioré grâce à un entrefer plus étroit (champ magnétique plus élevé pour le même type d'aimant). L'inconvénient est la hauteur minimale du ruban nécessaire pour permettre une liaison mécanique avec la membrane, y compris pendant les déplacements dans l'épaisseur de la plaque de champ. Il offrira ainsi une bonne tranmission mécanique dans le sens du déplacement, lequel se fera non plus sur une surface, mais sur une ligne. Ainsi, le rapport surface motrice/surface mue va être

réduit (à cause du principe « Riffel » utilisant une membrane à charnière centrale). On peut s'attendre à un phénomène d'instabilité dû à plusieurs raisons. Une mauvaise stabilité mécanique du ruban moteur dans le sens horizontal sera renforcée par une instabilité verticale due à la présence de la charnière centrale (à cet effet, il avait été prévu des fils stabilisateurs placés à la base du ruban moteur). Enfin les fractionnements non contrôlés de tout l'ensemble vibrant auront pour effet des mouvements ondulatoires non contrôlés du ruban transducteur, dans le sens de son épaisseur. On se heurte ici à des problèmes de rendement qui exigent un entrefer étroit. De plus, un ruban trop fin ne serait pas assez rigide dans le sens latéral et entraînerait des irrégularités de la bande passante et des risques de contacts mécaniques entre le ruban et les pièces polaires. Sur la figure 62 on voit l'aspect en coupe de ce transducteur. Il était de forme plate et allongée, ressemblant au transducteur électrostatique push-pull. La membrane, afin d'acquérir une certaine rigidité était constituée de quatre parties légèrement bombées. Pour cela, cette membrane était moulée et le dessus en était gaufré. Après montage final, (figure 62) la surface vibrante mesurait 555 × 120 mm. Ce transducteur tirait son nom de « Riffel » (en anglais « ripple ») de la membrane réalisée en duralumin à surface ondulée.

Comme on peut le voir sur la figure 62, une bobine d'aluminium était placée dans le sens de la plus grande dimension. L'impédance obtenue était de 0,25 Ω. La liaison en V permettait de maîtriser le travail en « charnière » des membranes, vis-à-vis de la stabilité de positionnement vertical du ruban. L'instabilité mécanique latérale

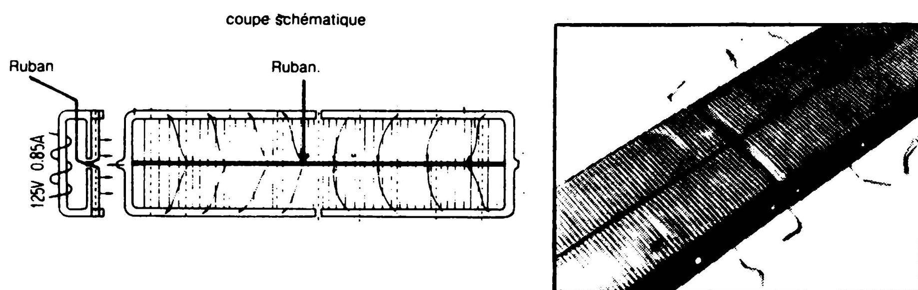



*Fig. 62 : Haut-parleur dit « Riffel » travaillant comme une charnière mue longitudinalement en son centre par un ruban plongeant dans un champ magnétique. Ce haut-parleur a été proposée par la Siemens et Halske vers 1930. « Riffel » provient du mot anglais « ripple » et signifie « gaufré » ou « ondulé ».*

s'en trouvait amoindrie et la liaison mécanique aux 4 membranes était solutionnée.

Le ruban se trouve à un emplacement mécaniquement assez instable, puisque placé derrière la « charnière ». 18 fils placés de part et d'autre du ruban réduisent cette instabilité en forçant le ruban à ne travailler que dans le sens vertical.

Un électro-aimant très puissant, travaillant sous 120 V/0,85 A était disposé à l'arrière, sur un cadre rigide dont une partie formait les pièces polaires et les plaques de champ. A l'arrière du transducteur, des ailettes de refroidissement étaient disposées sur les bobines. Puisque les parties latérales sont fixe, faisant office d'axe de pivotement, on ne peut affirmer que le travail se fait en piston. Il s'agit plutot d'un travail en charnière, s'effectuant longitudinalement à partir du centre. La membrane ne travaille pas en flexion, mais en bloc, sauf aux endroits où vont se placer les suspensions. Le rendement d'un tel système est assez faible, de l'ordre de 85 dB/m/W.

Monté sur un baffle, comme le permettait sa construction externe (figure 63), sa bande passante était assez étonnante pour l'époque. Son rendement et sa bande passante en faisait un concurrent du haut-parleur électrostatique de Vogt. Ce haut-

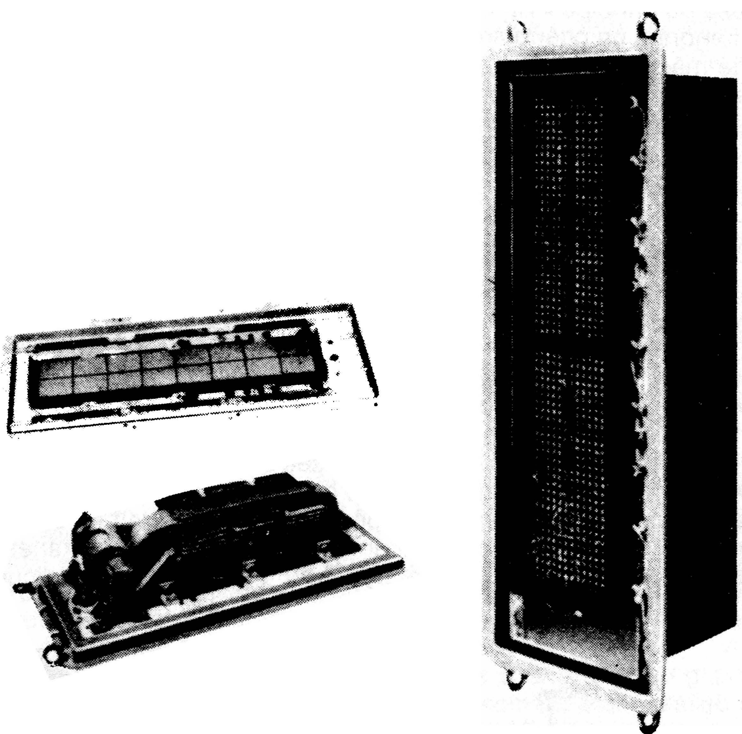


*Fig. 63 : Vue du haut-parleur Riffel*

parleur Riffel fut commercialisé par la Téléfunken & Halske vers 1930. Il était possible de monter plusieurs éléments en série sur un grand baffle ce qui permettait d'obtenir un niveau acoustique important, y compris dans le grave, grâce à une fréquence de résonance très basse (environ 30 Hz). Ce haut-parleur est sans doute le premier haut-parleur électrodynamique utilisant une membrane plane.

Notons que l'on peut diviser les hauts-parleurs à ruban en plusieurs catégories, selon le positionnement du ruban :

- vertical dans l'entrefer
- à plat dans l'entrefer
- en zig-zag dans l'une ou l'autre de ces positions
- en « escargot ou selon des variantes diverses.

Ajoutons que le ruban, et ce, pour toutes ces dispositions, peut être remplacé par des fils placés côte à côte, avec ou sans support.

Tous ces systèmes peuvent être fixés sur une membrane rigide comportant une ou plusieurs suspensions. Une membrane plus fine peut être utilisée. Souple, elle sera simplement fixée sur son pourtour à un cadre rigide. Nous retrouvons là le travail en flexion, le « Winding Motion » des haut-parleurs électrostatiques et des haut-parleurs électrodynamiques à membranes planes. Ces quelques considérations pour montrer l'infinie possibilité des variantes pouvant être réalisées à partir du meme principe de base : le haut parleur à ruban.

## Le haut-parleur Kagéyama

Né vers 1935 au Japon, ce haut-parleur est resté très longtemps dans l'ombre, même dans son pays d'origine. Ce transducteur peut être considéré comme une

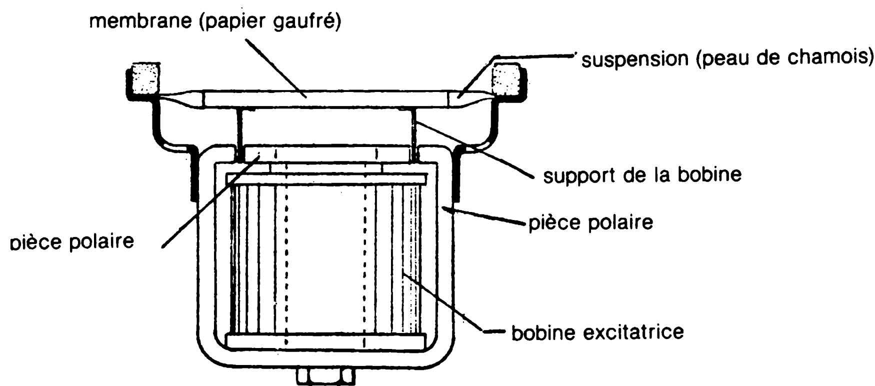



*Fig. 64 : haut-parleur Kagéyama*

extrapolation des systèmes Riffel et Blatthaller (ce dernier sera étudié plus loin). Comme le Riffel il utilise un positionnement vertical pour le conducteur mobile. Par contre, comme le Blatthaller, plusieurs conducteurs parallèles sont montés en série sur une même membrane qui travaille en piston.

Ce haut-parleur original est décrit sur la figure 64. Il utilise une membrane en papier pressé comportant plusieurs ondulations longitudinales. Plusieurs conducteurs mobiles (rubans) sont fixés sous cette membrane.

La figure 65 montre la vue en coupe de la membrane : On peut voir un des conducteurs mobiles. Les « jambages », qui servent de liaison avec la membrane, vont également rigidifier cette dernière.

La structure de la membrane est particulièrement bien choisie. Simple de forme, la disposition en croix du sens des corrugations de la membrane par rapport aux conducteurs mobiles d'une part, la surface de celle-ci (faite d'une succession de portions de cylindre) d'autre part, en font un bloc rigide et léger, malgré l'utilisation du papier.

Sur la figure 65, on voit aussi que la jonction conducteur/membrane, le profil de la

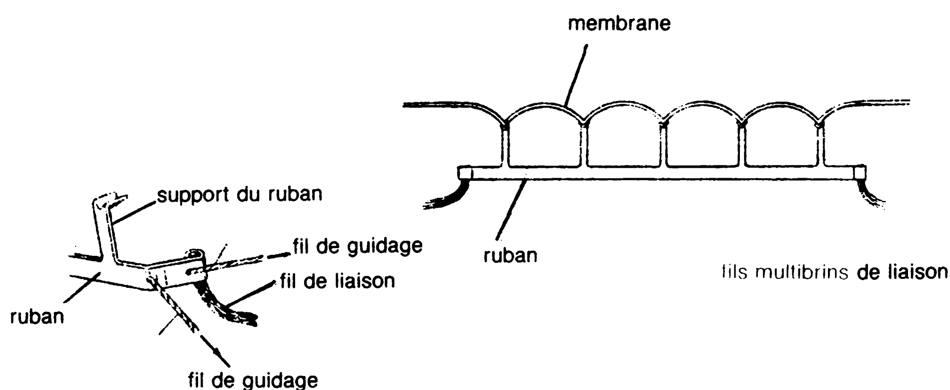



***Fig. 65 : Vue en coupe de la membrane***
***Remarquer la fixation dans le sens opposé au gaufrage de la membrane (90° par rapport à celle-ci)***
***Détail de la fixation de la bobine et des fils de guidage, nécessaires au centrage.***

membrane (partie concave) permettent un angle d'attaque inférieur à 90°. Ceci est intéressant du point de vue vecteur de force (angle de positionnement de la membrane par rapport à la direction de la force motrice pour lequel le vrai haut-parleur à ruban est avantageux : cet angle est pour lui nul.)

La première version du 1er haut-parleur Kagéyama possédait une bobine excitatrice assez volumineuse. Placée au centre, elle ne permettait de disposer que de deux entrefers (figure 66). Par la suite jusqu'à des modèles plus récents de 1973, le moteur excitateur fut remplacé par un aimant central, puis par des aimants en barre, ce qui permit de placer jusqu'à 4 conducteurs.

Là aussi il se produit, pendant le mouvement vertical de fonctionnement, une vibration latérale parasite. Elle est due principalement à une mauvaise stabilité mécanique du ruban collé verticalement. Selon M. Tomo Kageyama il existe, même à très basse fréquence, un phénomène d'instabilité latérale. Cet effet est facile à démontrer en déplaçant à la main le conducteur plat dans l'entrefer. Cette expé-

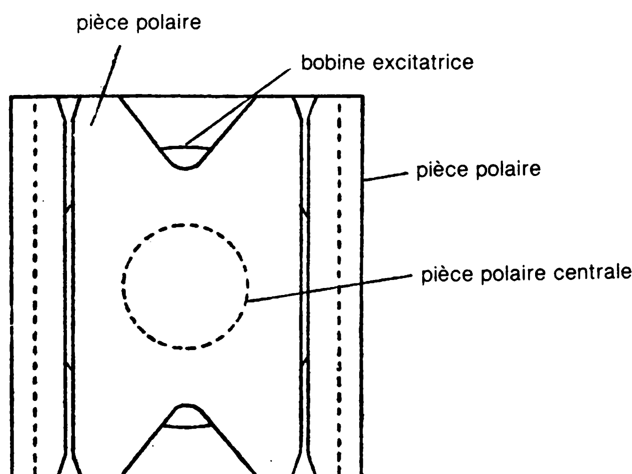



*Fig. 66 : Configuration des pièces polaires*

rience permet de constater que la loi de Fleming n'est pas parfaite vis-à-vis de la pureté du sens de déplacement. Alors qu'un piston disposé sous le ruban donnerait un mouvement purement vertical, les conditions de travail donnent en pratique un mouvement latéral parasite. M. Kageyama transposait cette explication sur le violon dont les cordes,lesquelles, bien que frottées dans le sens horizontal, vibrent en fait sous plusieurs angles. Il s'agit peut-être ici de problèmes relatifs aux très faibles variations de champ dans l'entrefer, aux fuites et non-linéarités magnétiques. Ces conditions de stabilité (ou d'instabilité) sont d'ailleurs retrouvées dans l'équation de Mathieu.

Sur le haut-parleur électrodynamique de Rice-Kellogg, cet effet est atténué par la forme cylindrique de la bobine mobile et par la présence de deux suspensions. Dans une configuration plate et rectiligne, cas du ruban posé en long et sur sa tranche dans l'entrefer, cet effet est particulièrement prononcé. Pour résoudre ce problème le haut-parleur de M. Kagéyama possède des fils stabilisateurs placés en V à l'extrémité de chaque conducteur (c'était aussi le cas du haut-parleur Riffel cité plus haut). Ces fils réduisent le déplacement latéral par un effet d'étirement. Il y a en

tout huit fils stabilisateurs pour deux conducteurs mobiles. Dans les versions récentes à quatre conducteurs, il faut donc seize fils stabilisateurs. Ils sont alors utilisés deux par deux, disposés en V de part et d'autre de chaque ruban. Dans la première version le conducteur mobile avait une épaisseur de 0,4 mm et le diaphragme mesurait 12 × 12 cm. La configuration à deux bobines, ou la pièce polaire centrale ne représente qu'un seul pôle, nécessite de relier extérieurement les rubans afin de les mettre en série dans le bon sens.
Pour une configuration en zig-zag on peut facilement alterner les sens d'aimantation des entrefers, surtout si l'on utilise des aimants de petites tailles comme des ferrites, par exemple.

Le haut-parleur Kagéyama est donc, en ce qui concerne le positionnement du conducteur mobile, similaire au Riffel. Ici, le conducteur mobile est plongé dans le champ magnétique d'un entrefer étroit. Cependant, le travail de la membrane en l'absence de « charnière » n'est plus le même. Ici la membrane entière se déplace, théoriquement du moins, en vrai piston. A cet effet, son pourtour est muni d'une suspension. Composée d'une peau de chamois, elle avait l'avantage d'être

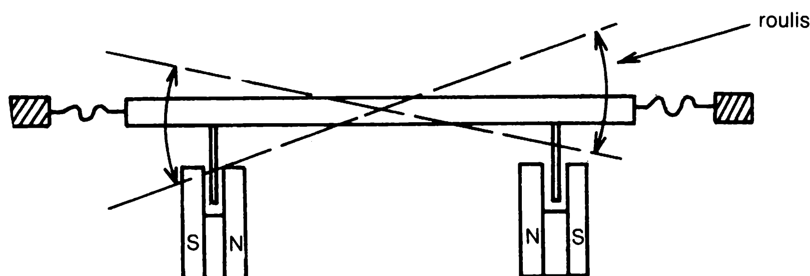



***Fig. 67 : Description de l'effet de roulis. Cet effet est gênant et provoque une augmentation de distorsion par harmonique 3.***
***Il rend nécessaire l'emploi d'un entrefer plus large, ce qui fait perdre du rendement.***

étanche et acoustiquement tout à fait inerte. Sa longévité et sa stabilité mécanique dans le temps laissaient, par contre, à désirer.

Deux autres problèmes, qui n'existaient pas sur le haut-parleur « Riffel », vont apparaître sur les modèles à multiconducteurs, avec une membrane se déplaçant en bloc. Le premier est l'effet de « roulis ». Cet effet apparaît dès que la moindre différence de masse ou de force motrice va se manifester entre les conducteurs. Un « balancement » s'ajoute alors au déplacement en piston. La figure 67 montre l'effet de roulis, générateur d'harmonique 3 et d'harmoniques surtout impairs. Dans le haut-parleur « Riffel », ce roulis ne se produisait que très rarement, puisque les bords étaient fixes et servaient d'axe de pivotement (déplacement d'une charnière à pans rigides, force appliquée sur l'axe de la charnière). Avec une membrane se déplaçant en bloc, l'effet de roulis est presque inévitable, surtout si une seule suspension périphérique est utilisée. Dans le haut-parleur Kagéyama les fils, grâce à un positionnement inférieur à celui de la suspension périphérique, servent aussi à minimiser ce « roulis ». Ce roulis peut paraître sans importance si l'on considère que la membrane est mue en plusieurs points avec une force motrice identique. En fait, il s'accompagne d'un autre effet encore plus gênant, due aux différences de souplesse dans le système de suspension.

Pour mettre cet effet en évidence, il suffira de mesurer en divers points de la membrane, la pression nécessaire pour donner un déplacement donné. Sur un

système où se manifeste un « roulis » important, on s'aperçoit qu'il faut exercer une pression plus grande au centre que sur la périphérie de la membrane. Cet effet de roulis s'accompagne en effet d'un travail partiel de la suspension. Une pression exercée au centre oblige toute la suspension à travailler d'où une baisse relative de la souplesse. Dans ce cas, et même si chacun des conducteurs exerce une force motrice égale, les conducteurs placés sur la périphérie auront tendance à générer sur la membrane un déplacement plus important que ceux du centre.

Le second défaut d'un système multiconducteur sera la gêne fâcheuse, apportée par la présence de nombreuses pièces polaires et aimants. La membrane va se trouver, en plusieurs points de sa partie dorsale, face à des parties plus où moins planes. Lors d'un mouvement, il se produira en ces divers points, des compressions et expansions d'air. Les volumes d'air mis en mouvement sont inégalement répartis. Il peut s'en suivre, par effet capacitif équivalent, une ou plusieurs résonances parasites. Les derniers projets de M. Kagéyama, possesseur de bien d'autres brevets dans tous les domaines de l'électro-acoustique, concernaient la réalisation d'un haut-parleur qui aurait utilisé des circuits magnétiques cylindriques.

Cette disposition où le dégagement arrière est amélioré et les fuites magnétiques fortement réduites (figure 68), aurait aussi l'avantage d'un entrefer se passant des pièces en fer doux rapportés. Par sa conception en une seule pièce cylindrique, il n'y a plus de collage ou de réglage à effectuer au niveau de l'entrefer. Cette disposition n'a malheureusement été à ce jour, ni expérimentée, ni appliquée.

Le haut-parleur Kagéyama est un peu moins directif qu'un diaphragme parfaitement plan, en raison de sa surface ondulée. Dans l'aigu la directivité est prononcée.

Le rendement de ce haut-parleur est intéressant grâce, surtout, au positionnement des conducteurs mobiles.

Dans quelques prototypes M. Kagéyama a tenté, avec succès, de remplacer le conducteur d'aluminium par une série de fils parallèles. De section ronde ou plate, ils permettaient d'élever l'impédance à 8 ou même 16 Ω. Ces montages ıvaient, par contre, l'inconvénient d'une construction délicate de la bobine mobile et la nécessité d'une liaison extérieure, selon la disposition des circuits magnétiques. La disposition en zig-zag est bien entendu possible, mais entraîne une construction très difficile de la bobine.

Le déplacement permis par ce système était aussi important qu'avec un haut-parleur électrodynamique du genre Rice-Kellogg. Le niveau acoustique maximum était donc relativement élevé. Une seule cellule montée soit dans une enceinte, soit sur un baffle, peut suffire à une écoute en appartement. Cet appareil, tout comme le

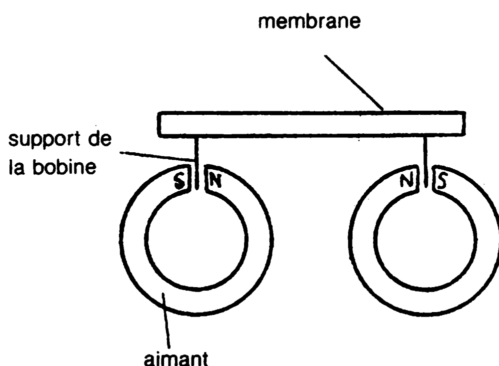



*Fig. 68 : Idée proposé par T. Kagéyama pour améliorer son haut-parleur. Ces pièces polaires cylindriques réduisent les fuites magnétiques et permettent d'obtenir un bon dégagement de l'onde arrière.*

« Riffel » fonctionne en doublet. A l'exemple du haut-parleur électrostatique push-pull, ils ont une caractéristique de directivité en « 8 ».
La distorsion provoquée par l'effet de « roulis » (accompagnée de l'effet d'ondulation latérale parasite) est sensible si la limite de saturation est atteinte. Elle est alors ressentie comme un décentrage du conducteur dans l'entrefer. Noter que ce décentrage est dynamique, et non statique.

Par ailleurs, la suspension étant disposée sur tout le pourtour de la membrane, sépare d'une manière totalement étanche la partie avant de la partie arrière. Ceci n'était pas le cas du haut-parleur « Riffel » (haut et bas de la « charnière » non étanches) .Cette considération aura son importance pour le montage dans une enceinte, close ou accordée.

**Le haut-parleur Blatthaller**

Ce haut-parleur, très intéressant, a fait couler beaucoup d'encre, dans tous les pays. Sa conception était révolutionnaire pour l'époque et ses nombreux détails en étaient remarquablement étudiés.

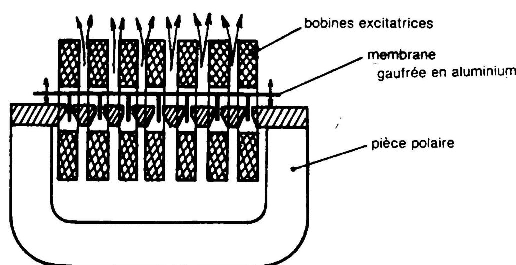
Il fut conçu par N.W. Mac Lachlan, auteur de plusieurs livres sur les transducteurs et professeur dans les universités d'Illinois et de Washington. Il voulait par là résoudre plusieurs exigences : puissance acoustique, bande passante et fidélité de reproduction. Le haut-parleur de Rice-Kellogg (décrit ultérieurement) n'apportait une solution pratique qu'au prix de bien des compromis.

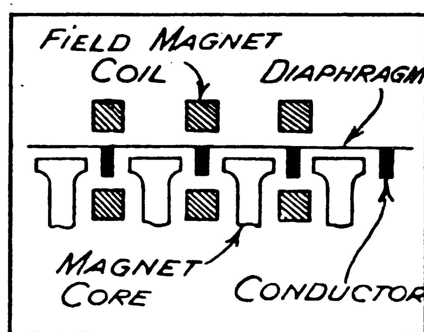
Dans ce haut-parleur de Rice-Kellogg la membrane conique est mise en mouvement vibratoire par force motrice annulaire. Cette force située près du centre s'exerce sur une surface très réduite par rapport à celle du cône. Alors qu'aux fréquences basses le système travaille presque comme un parfait piston, aux fréquences plus élevées la raideur et l'épaisseur de la membrane, sa masse vont provoquer un fractionnement dynamique de la membrane. Elle se met alors à vibrer selon des modes très irréguliers, en fonction de la fréquence appliquée. Aux fréquences élevées la structure de tout l'équipage mobile (membrane,suspension, bobine) n'est plus rigide. La bobine mobile ne peut plus alors contrôler le travail en piston de la totalité de la membrane. Ceci sera traité plus en détail dans un paragraphe séparé, mais d'ores et déjà nous pourrons nous attendre à des défauts de linéarité de la courbe de réponse et ce tant en fréquence qu'en phase.

En répartissant la force motrice sur une surface la plus importante possible, il est théoriquement possible d'améliorer le travail en « piston ». Seul le haut-parleur à ruban répond à cet idéal, car 100 % de la membrane est mue par la force motrice. On n'utilise plus la rigidité de la membrane pour faire mouvoir une surface plus grande, ce qui était responsable en grande partie du fractionnement non contrôlé. Par contre, ce principe ne peut être appliqué que pour des surfaces rayonnantes réduites, limitant l'utilisation aux fréquences élevées .

Réalisé dès 1930 sous forme de prototype le Blatthaller fut commercialisé en 1934 par la firme Siemens & Halske. Le diaphragme plan utilisé était en alumimium, gaufré en surface, afin d'obtenir un ensemble à la fois léger et rigide. Sur la figure 69, on voit une vue en coupe de ce transducteur. Sur le diaphragme plan est collé, en zig-zag et sur sa tranche, un ruban d'aluminium. Ce ruban est plongé dans un champ magnétique intense. En effet, Mac Lachlan ne se contente pas d'utiliser le champ magnétique créé par deux aimants placés côte à côte. Il utilise plusieurs bobines excitatrices. Ces bobines, minces et allongées, placées côte à côte, intercallées avec les pièces polaires pourront avoir leur centre muni d'une pièce polaire, formeront ainsi de longs et minces entrefers où l'énergie magnétique sera intense.

Ce haut-parleur était destiné à la sonorisation en plein air, aussi devait-il être très puissant. Bien qu'il ait existé plusieurs variantes, le modèle le plus connu possédait une membrane de 60 × 90 cm. Quatre bobines excitatrices consommaient près de




*Document extrait du brevet disposé par Mac Lachlan sur le Blatthaller (Revue du Son n° 97).*

*Fig. 69 : Vue en coupe du transducteur*
*Plusieurs versions ont dû exister entre les premiers prototypes de N.W. Mac Lachlan et la version réalisée ultérieurement sous licence par la Siemens & Halske.*

1 kW. Sur la figure 70, on voit l'aspect de ces bobines, disposés de part et d'autre du diaphragme. Noter, sur la figure 69 que les conducteurs mobiles sont placés au centre des bobines excitatrices, ce qui ne sera pas le cas d'autre variantes, que l'on verra plus loin. On voit également, sur cette figure, que le déplacement de la membrane oblige l'air à passer entre les bobines excitatrices. Selon Mac Lachlan, des défauts de linéarité aux fréquences élevées peuvent être ainsi créés.

Par contre, sous l'action d'un courant continu passant dans le zig-zag du ruban moteur, la grande puissance du champ magnétique et sa concentration dans un entrefer étroit permettaient à la membrane de soulever une masse de 20 Kg.

Ce résultat énorme se passe de commentaire.

Selon son inventeur, le rendement du « Blatthaller » atteignait 25 % et une puissance de 800 watts aux bornes de l'équipage mobile se traduisait par une puissance acoustique de 200 watts, ceci lorsque le haut-parleur était monté sur un large baffle. La figure 71 montre une photo du fameux « Blatthaller », appareil qui pesait 280 kg seul, 300 kg avec son système de fixation. L'amplificateur qui précédait ce monstrueux (mais fidèle) haut-parleur avait une puissance de 750 watts. Il utilisait des tubes de puissance triodes à chauffage direct, montés en push-pull, avec, pour chacun, une dissipation plaque de 250 W (du genre DA 250, fabrique

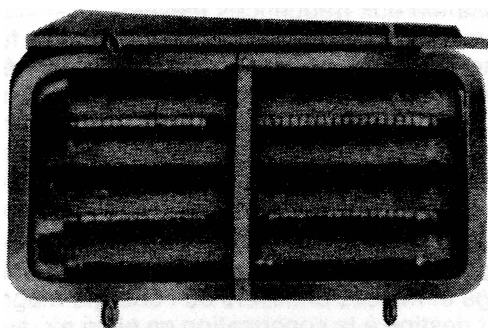


*Fig. 70 : Aspect des bobines, vues de l'arrière du Blatthaller.*

GEC en Grande Bretagne). Ces tubes, avec une tension plaque au repos de 2500 V, permettaient d'obtenir, sans contre-réaction, une puissance modulée de 800 watts. Un étonnant taux de distorsion de 4 % était atteint, grâce à l'exceptionnelle linéarité de ces tubes de puissance.

Un fait historique a fait couler beaucoup d'encre : Ce transducteur extrêmement puissant et de rendement remarquable, malgré sa fidélité rare pour l'époque (1934) pouvait, grâce à sa puissance, être entendu à 5 km de distance.

La figure 72 montre une autre variante de ce transducteur. Un seul circuit magnétique, sur le côté intérieur de la membrane était utilisé. Ce schéma a d'ailleurs déjà été publié dans un remarquable article de Remy Lafaurie (Revue du Son n °97), qui traitait du haut-parleur Orthophase (étudié plus loin).

Le livre « Loudspeakers » de Mac Lachlan (publié pour la première fois en 1934 par la Oxford Press, puis réimprimé en 1960 par Dover Publications de New-York, traitait, d'une manière non surpassée à ce jour, des théories du haut-parleur. Afin de mieux démontrer l'avance de ses recherches, il a été repris ici des figures qui furent publiées dans ce livre, concernant des tests de réponse transitoire sur impulsions brèves et sur trains d'ondes (figures 73 et 74). Mac Lachlan était le premier à expérimenter cette nouvelle méthode et à en revendiquer les possibilités. Cette méthode s'est avérée par la suite être une des bases d'étude particulièrement solide pour l'étude du comportement transitoire de la membrane en vibration, et

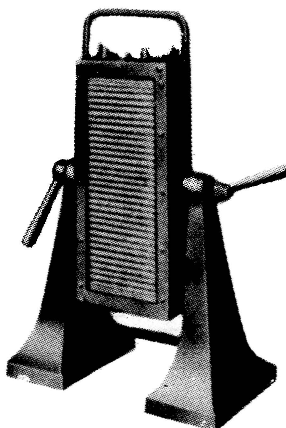


*Fig. 71 : Blatthaller, vue de face. Cet appareil pesait plus de 280 kg seul, 300 kg environ avec un système de fixation. Les bobines excitatrices consommant 800 W permettaient à la membrane de soulever un poids de 20 kg. Il pouvait accepter plus de 800 W et son rendement de 25 % donnait une puissance acoustique de 200 W, ce qui permettait de l'entendre à plusieurs kilomètres.*

reste tout à fait actuelle. La figure 73 montre les bienfaits d'un champ magnétique intense sur la réponse transitoire avec deux mesures, l'une à 4000 Gauss, l'autre à 19 000 Gauss (valeur qui relève de l'exploit pour l'époque). On voit qu'à 19 000 Gauss les signaux sont très nettement améliorés par rapport au champ de 4 000 Gauss.

Sur la figure 74, même remarque pour le traînge. L'avance des recherches que Mac Lachlan effectua à propos du Blatthaller apparaît évidente pour une époque aussi reculée que 1930. Ce sont probablement ces résultats fructueux et les nombreuses variantes proposées par la suite, qui attirèrent l'attention d'ingénieurs du monde entier. La similitude est frappante entre la figure 72 et le haut-parleur Kagéyama.

La suppression de la partie frontale des pièces polaires (ou des bobine excitatrices) devait sans doute être pour Mac Lachlan une source de problèmes, car la disposition de la figure 69 permet de concentrer le champ magnétique grâce aux pièces polaires placées devant le diaphragme.

En disposant les pièces polaires sur la partie dorsale on n'utilisait plus que les champs de fuite des aimants. Le champ magnétique et le rendement étaient inférieurs et la réponse transitoire baissait de qualité. Dans la version de la figure 72, on note aussi que le ruban d'aluminium est remplacé par un ruban de cuivre. Plus résistant mécaniquement et d'une résistance électrique inférieure, il est par contre plus lourd ce qui demande le choix d'un compromis. L'aluminium, plus fragile est en plus difficile à sou-

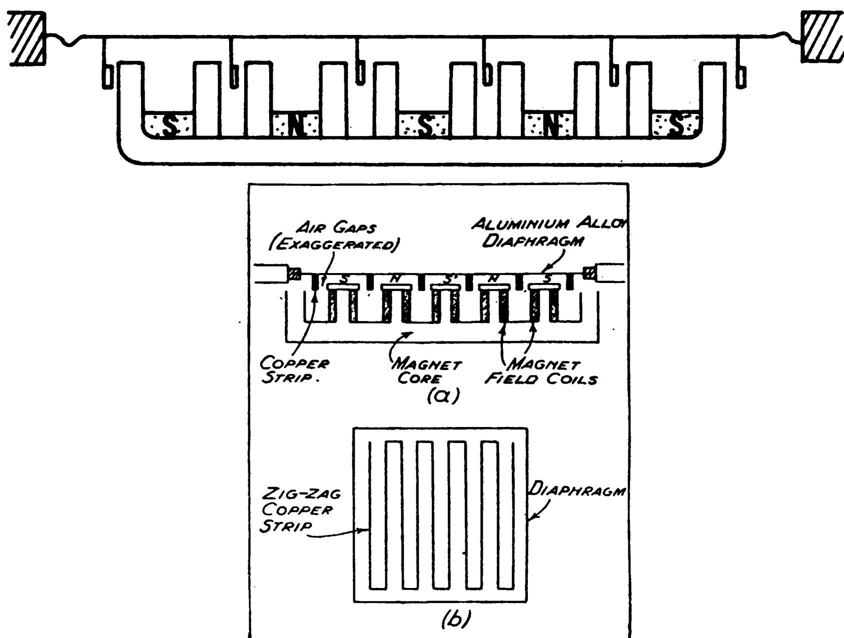



*Fig. 72 : Une autre variante du Blatthaller, mais utilisant le circuit magnétique que sur un seul côté du diaphragme (d'après R.D.S. N° 97).*

der et ses soudures sont moins robustes qu'une soudure cuivre/cuivre. Un effet thermoélectrique et électrochimique, au niveau de la jonction, réduit peu à peu la rigidité à cet endroit : cet effet avait été découvert dès 1820 par le physicien français Jean Peltier.

Le remplacement de l'aluminium par le cuivre peut produire une légère remontée de la courbe d'impédance aux fréquences élevées (légère différence de coefficient de self-induction pour une résistance en continu équivalente). Cependant, comme l'impédance est très basse et le conducteur un ruban et non une bobine, ces différences sont presque imperceptibles.

Un autre point important est la position du ruban dans l'entrefer magnétique. Placé verticalement, il est moins soumis aux variations éventuelles de champ magnétique . En effet, si pour une amplitude de déplacement donnée, des variations de flux se font sentir, elles seront moins sensibles sur un conducteur disposé verticalement que sur le même conducteur en position horizontale. Il se produira une compensation des variations de champ magnétique dans un cas et pas dans l'autre. Le cas d'une bobine longue revient à celui du ruban vertical à la différence près que les compensations, à l'intérieur

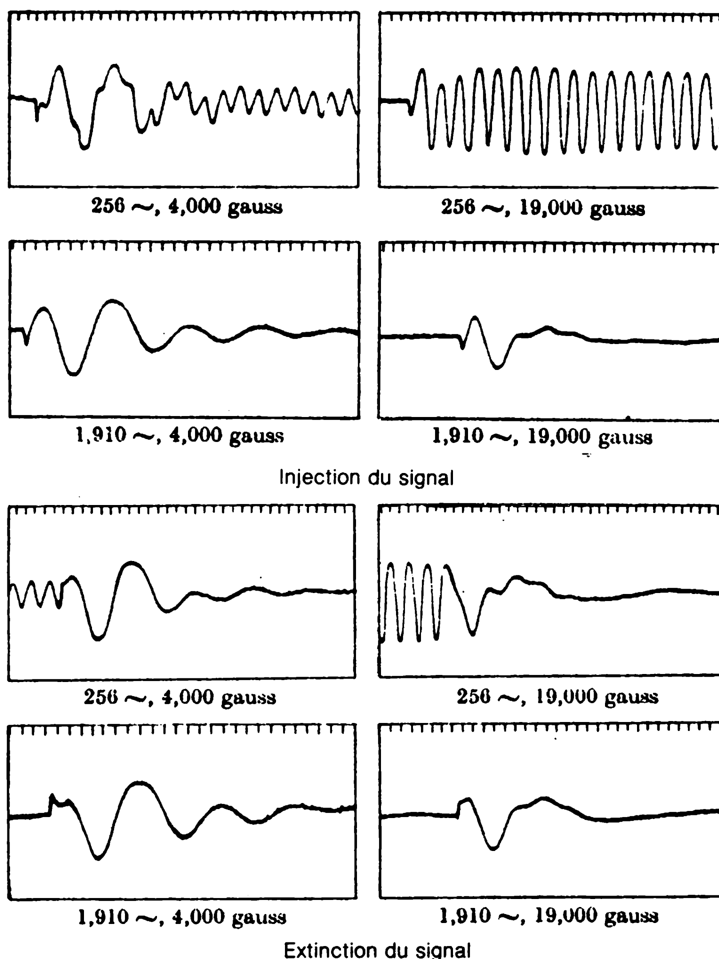



*Fig. 73 et 74 : Test de réponse transitoire (trains d'onde) utilisés dès 1930 par Mac Lachlan pour démontrer les bienfaits d'un champ magnétique puissant, sur son haut-parleur Blatthaller.*
*Deux tests sont effectués, l'un au moment de l'injection du signal, l'autre au moment de l'interruption de ce signal.*
*Pour ces deux conditions, deux fréquences sont utilisées, 256 Hz et 1910 Hz (d'après Loudspeakers, par Mac Lachlan, 1934).*

des conducteurs se font en parallèles pour l'un et en série pour l'autre.

Encore sur la figure 72, on note que les parties dorsales de la membrane situées entre les conducteurs font face aux pièces polaires. Les déplacements de la membrane entraîneront une résonance due à la compression et à l'expansion de l'air à ces endroits. S'il est certain que la construction de la figure 72 offre un meilleur dégagement que celle de la figure 69, c'est au prix d'une baisse du rendement et d'une diminution de la qualité de la réponse transitoire.

Point important de la conception : la membrane réalisée en aluminium ou en duralumin gaufré voit les conducteurs placés transversalement afin d'accroître sa rigidité. On peut cependant imaginer, comme sur d'autres versions proposées par Mac Lachlan, une membrane souple et fine qui travaillera non plus en piston mais en flexion. Cette idée a été reprise ultérieurement, avec le choix d'un conducteur non plus vertical mais

disposé à plat, pour des raisons pratiques de fiabilité et de facilité de fabrication.
Ces deux conceptions très particulières des haut-parleurs Riffel et Blatthaller ont inspiré ainsi de nombreux autres inventeurs.

## Le Blatthaller miniature

Cette version fut décrite en décembre 1959 dans la revue anglaise Hi-Fi News. Son auteur, Stanley Kelly, est célèbre pour ses recherches sur les haut-parleurs et pour son haut-parleur à ruban commercialisé par la firme Decca.
Sans doute motivé dans ses recherches par la crainte de voir l'emporter la théorie du haut-parleur électrostatique, le haut-parleur à ruban peut passer pour une première « revanche ». Les excellents résultats obtenus par ce ruban ont sans doute poussé S. Kelly à tenter de l'améliorer et d'étendre la reproduction du bas du spectre. En effet son tweeter, même avec l'aide d' un pavillon, ne pouvait guère descendre au-dessous de 3 000 Hz. Le ruban, utilisé pour le grave aurait eu le gros inconvénient de pièces polaires trop volumineuses et presque impossibles à réaliser. Et ce, sans tenir compte du problème des fuites acoustiques sur les côtés du ruban. La transformation du haut-parleur Blathaller était donc une solution fort séduisante. S'inspirant d'un montage tel que celui de la figure 72, il mis à plat les conducteurs mobiles. Cette disposition, très difficile à réaliser demandait une membrane relativement rigide et épaisse pour pouvoir fonctionner. Une position horizontale du conducteur mobile , disposé en zigzag, présente donc des avantages et des inconvénients.

Du côté des avantages : on peut noter une grande facilité de fabrication (dépôt conducteur, collage d'un ruban etc.), un bon centrage des circuits conducteurs vis-à-vis des entrefers et peut être aussi une meilleure dissipation thermique. Le défaut est une perte sensible de rendement (due aux conducteurs qui se trouvent cette fois dans le plan de la membrane et n'utilisent plus que le champ magnétique de fuite des aimants placés sous la membrane). La figure 76 montre l'aspect en coupe d'un tel transducteur. A part la position du conducteur, il s'agit du même principe que le Blathaller. Ce transducteur a également été décrit par Rémy Lafaurie dans un article (Revue du Son n° 97).
Dans l'article de Hi-Fi News, son auteur le destinait à étalonner les microphones et pour effectuer des mesures, ce pour le compte de la firme Cosmocord où précisément Stanley Kelly était alors ingénieur en chef (il reste encore aujourd'hui un correspondant de la revue Hi-Fi News).
Ce transducteur de petite taille avait une membrane de 125 x 150 mm. Cette membrane était découpée dans un film de Mélinex (nom commercial d'un film comparable au mylar), sur lequel était déposé un ruban conducteur (figure 75).
Comme il n'y avait que six aimants de section rectangulaire (75 × 25 × 10 mm), le ruban passait sept fois en zig-zag sur le film plastique.
L'idée d'utiliser non plus un dépôt conducteur sur une face, mais sur les deux, est sans doute une importante amélioration dans le principe du Blatthaller. L'impédance s'en trouve augmentée une fois les rubans reliés en série. Cette innovation est importante car elle peut en apporter d'autres (par exemple un mélange de canaux se faisant au niveau du transducteur, ou une possibilité d'asservissement par le deuxième circuit). Noter que l'on peut aussi mettre plusieurs pistes, plus fines, en série (figure 77) pour encore augmenter l'impédance. Cela peut également se faire sur les deux faces. En disposant une série d'aimants de part et d'autre de la membrane il devient possible de coupler deux systèmes de transducteurs. Ceci sera appliqué ultérieurement à des ensembles où le principe électro-magnétique et le principe électrostatique fonctionneront sur le même montage. La configuration du transducteur se prête parfaitement aux deux principes. Il est possible d'utiliser

une face conductrice pour le ruban, l'autre pour la métallisation nécessaire au principe électrostatique. Plusieurs applications ont été faites sur des tweeters (rubans de tweeter à conducteurs multiples, membrane de casque fonctionnant sur un principe de circuits conducteurs en méandre ou en cercles multiples etc.).

Le Blatthaller miniature de Kelly, inspiré du Blatthaller original, était de conception simple et facile à réaliser. Il a donc lui-même servi de modèle pour de nombreux autres transducteurs (microphones, casques dynamiques, haut-parleurs solo, tweeters). Il existe plusieurs possibilités pour placer les aimants. Selon leur orientation les conducteurs mobiles peuvent se situer au-dessous des aimants (lorsqu'ils sont aimantés dans le sens de leur largeur) ou encore entre les aimants (cas d'une aimantation dans le sens de la hauteur). Les pièces polaires sont, suivant les cas, nécessaires ou pas. Dans certains casques, il existe des structures d'aimants particulières (par exemple de forme circulaire) comportant de multiples perforations, pour laisser passer le son et aimantés d'une manière complexe, dans la masse (multipolarités concentriques, aimantation en lignes parallèles, aimantation en « damier ». Ceci est avantageux du point de vue simplicité de construction et rigidité mécanique. Suivant les dispositions des aimants et leur orientation, ils sont parfois soumis à de forts champs démagnétisants, rendant impossible l'utilisation de certains aimants très puissants. Il faut aussi considérer que les circuits magnétiques des réalisations de type Blatthaller sont presque toujours ouverts, avec des conditions de désaimantation favorisées.

Comme il fallait s'y attendre, le résultat obtenu par le transducteur de Kelly (Blatthaller miniature) offre une bande passante large et régulière. Pour un haut-parleur solo cette bande passante s'étend, d'après la revue Hi-Fi News, entre 80 Hz et 12 kHz, à 2 dB près. Bien qu'il s'agisse d'un appareil destiné à la mesure, il est regrettable que M.S. Kelly n'ait songé ni à améliorer ni à commercialiser cette idée.

Sur la figure 76, on remarque une fois de plus, le mauvais dégagement de la face dorsale de la membrane. La surface des aimants face à la membrane, les fentes entre les aimants vont sans aucun doute favoriser des résonances. Dans le prototype expérimental de Kelly, ces fentes étaient remplies de mousse de polyuréthane, ce qui apportait une amélioration notable. Cette idée fut appliquée sur de nombreux transducteurs de ce genre. Sur les casques, il est d'ailleurs fait souvent usage de laine de verre très fine et ne dégageant pas de poussière

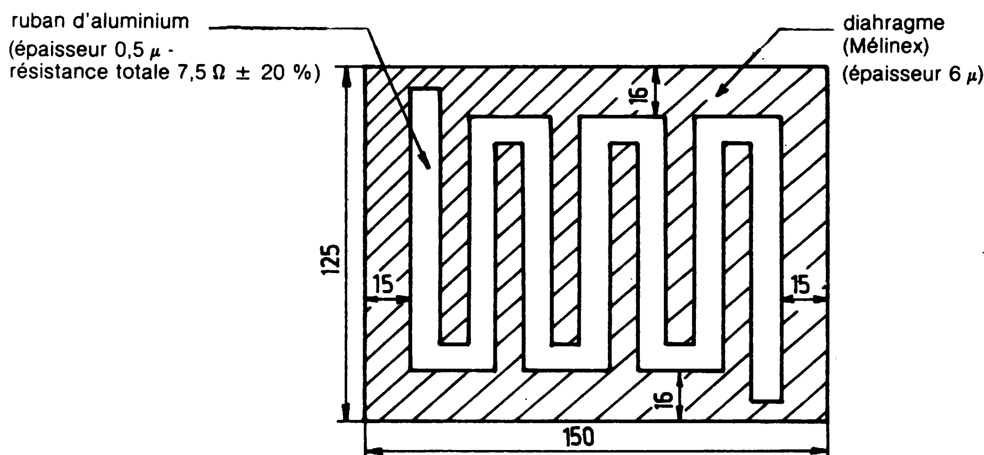



*Fig. 75 : Détail de la membrane utilisée sur le « Blatthaller » miniature de Stanley Kelly*

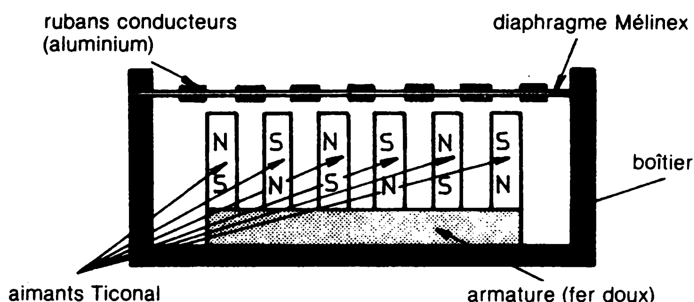



*Fig. 76 : Blatthaller miniature de Stanley Kelly, destiné initialement à l'étalonnage des microphones ; (D'après Hi-Fi News Dec 1959 et R.D.S. N° 97)*

## Le haut-parleur Gamzon

Ce haut-parleur n'a malheureusement jamais été commercialisé. Il fut présenté en 1959 dans une conférence à Stuttgart. Sur la figure 78 on voit qu'il s'agit d'une extrapolation du Blatthaller miniature de Stanley Kelly. Les aimants sont disposés cette fois de part et d'autre de la membrane. La disposition des aimants (figure 79) se sert des fuites magnétiques pour augmenter la distance membrane/aimants et permettre un déplacement plus important. Cependant, la perte de rendement est importante par rapport à la première version du Blatthaller de Mac Lachlan. En disposant les barreaux aimantés (ferrite, aimant ticonal etc.) de chaque côté de la membrane on obtient entre ces aimants une concentration des fuites du champ magnétique.

Les aimants mis face à face sont de même polarité. Deux types de fuites magnétiques seront utilisées ici : la fuite magnétique d'un aimant sur l'autre sur une même rangée, une fuite « croisée » de part et d'autre de la membrane. Comme on peut le voir sur la figure 79, ceci place les aimants en position virtuelle à l'emplacement même de la membrane.

Comme pour le cas du premier Blatthaller à moteur d'excitation, on retrouve l'avantage du champ magnétique intense et linéaire en fonction du déplacement de la membrane, avec le désavantage d'une ombre acoustique qu'apporte les aimants sur la membrane.

D'après les quelques informations recueillies sur le principe Gamzon, le conducteur métallique n'était déposé que sur une face de la membrane. Le haut parleur de Kelly utilisait, par contre, une métallisation sur les deux faces de la membrane.

Ses dimensions étaient un peu plus grandes que celles du haut-parleur de Kelly et les performances obtenues devaient certainement être excellentes.

Ce principe a cependant des limites. Un courant trop important peut détruire la surface métallique. En outre, une amplitude de déplacement trop importante devient désordonnée et risque de provoquer un contact bref (mais combien audible) entre le centre de la membrane et les aimants (par le mouvement en flexion de la membrane).

Un système large bande sera assez limité dans le bas. Dans l'aigu il est possible, grâce à des membranes fines et à des cellules de largeur réduite (par exemple 3 à 5 cm de large sur plusieurs dizaines de cm de haut) d'obtenir à la fois une bonne linéarité, jusqu'à plus de 20 kHz et de réduire l'effet directif en utilisant une cellule de grande hauteur.

Ces deux cellules transductrices, Kelly et Gamzon, sont à la base de pratiquement toutes les idées survenues ultérieurement. Ce système est très intéressant car il permet d'obtenir des résultats proches de ceux des systèmes électrostatiques

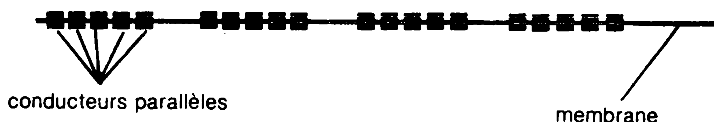



*Fig. 77 : Variante permettant de disposer plusieurs conducteurs parallèles, sur les deux faces, pour augmenter l'impédance.*

push-pull, de réalisation plus délicate. Quant à l'adaptation aux impédances de 8 ou 16 ohms, elle ne posait aucune difficulté de construction. Ce haut-parleur s'est érigé en rival du haut parleur électrostatique push-pull. Le seul avantage de ce dernier, sur ceux décrits ici, reste la possibilité d'une masse mobile (membrane) inférieure. En effet, une fine métallisation où une surface légèrement conductrice est suffisante alors que le haut-parleur électrodydamique demandera, sous peine de sévères limites de dissipation thermique (donc de niveau acoustique maximum admissible), un dépôt conducteur plus épais et plus lourd, où encore le collage d'un fil conducteur. Ces contraintes rendront obligatoirement la masse mobile plus importante. Il faut aussi considérer que le principe électrostatique exige une masse mobile très faible alors que le haut-parleur électrodynamique génère une force magnétique plus importante. Ceci permet, pour un même rapport force motrice/masse mobile de pouvoir utiliser une masse plus importante pour le système électromagnétique.

La seule limitation, pour le haut-parleur de Gamzon sera le débattement maximal de la membrane, devant se faire dans l'entrefer formé par les deux rangées d'aimants. Il ne faut pas perdre de vue non plus qu'un éventuel écartement plus grand entre les rangées d'aimants serait au détriment de la sensibilité mais à l'avantage de l'amplitude de vibration maximale. On retrouve ici, transposé, les problèmes relatifs au haut-parleur électrostatique push-pull.

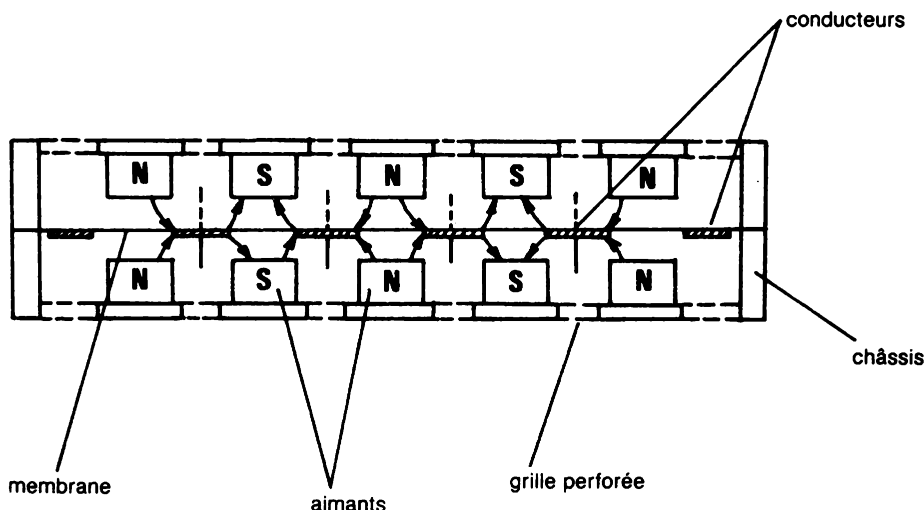



*Fig. 78 : Haut-parleur de Gamzon, basé sur la Blatthaller et le Blatthaller miniature. Cette idée sera encore reprise ultérieurement pour microphones et casques*

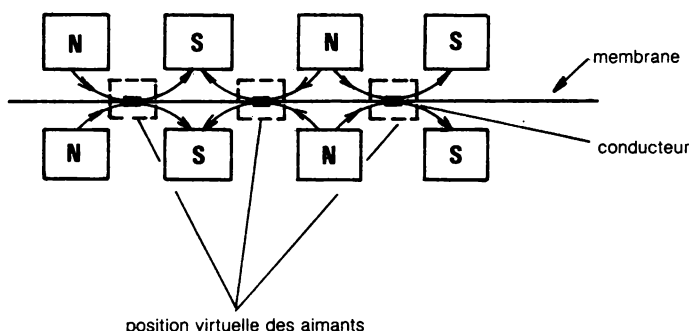



*Fig. 79 : Disposition des aimants créant un champ virtuel au niveau des conducteurs transducteurs. Cette méthode utilise donc les champs de fuite des aimants.*

## Le microphone Socapex « Isophase »

Cette réalisation est le fruit d'un travail sous licence Gamzon. Le principe est le même. Celui-ci étant parfaitement reversible, il peut parfaitement être appliqué au microphone. Il fut proposé à un prix très abordable, mais ses performances étaient remarquables (sa bande passante était, à 2 dB près, de 30 à 16 000 Hz).

La figure 80 montre son aspect extérieur. Sa cellule, similaire au principe Gamzon, avait pour dimension 70 × 50 mm. Un ruban imprimé en méandres permettait de faire monter l'impédance à environ 20 Ω, transformée ensuite en haute impédance par un transformateur incorporé.

La membrane était en mylar, épaisse de 6 microns. Le ruban était imprimé sur un seul côté. Afin d'être acoustiquement neutre la membrane recevait, à chaud, un gaufrage qui la marquait d'une multitude de creux et de bosses. Ce traitement en augmentait aussi la souplesse.

Bien qu'utilisé en tant que microphone ce transducteur était parfaitement réversible. Des contraintes de puissance admissible n'empêchaient cependant pas de l'utiliser pour un casque de haute qualité. L'idée sera reprise bien plus tard, par la

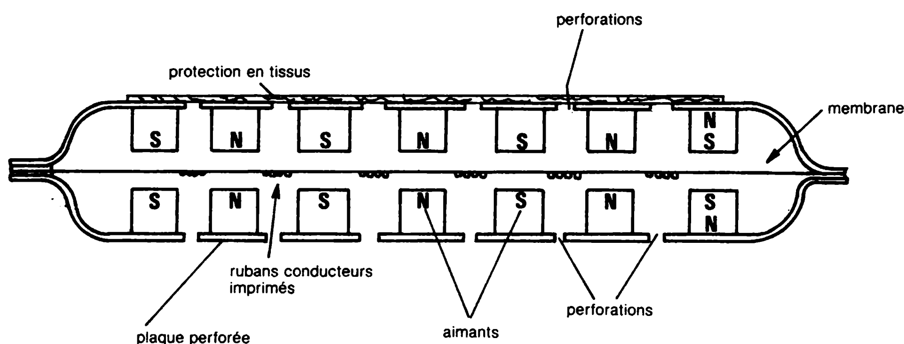



*Fig 80 : Microphone « Isophase », proposé en France par la firme Socapex vers 1962. C'est l'application du principe du professeur Gamzon, mais en microphone. Reversible, ce système fut repris par la suite pour la confection de casques dynamiques à membranes planes (Wharfedale, puis de nombreuses firmes japonaises), de haut-parleurs (Magnéplanar etc) et de tweeters (Infinity, Fostex etc).*

firme Wharfedale pour son casque « Isodynamic », puis, par la suite, par de nombreux autres constructeurs japonais, américains, anglais et allemands, pour la constructeurs de tweeters, casques et haut-parleurs. .

## Le haut-parleur Dynapleats

Ce transducteur, mis sur le marché japonais vers 1977, avait été étudié dès 1967 par M. Han-Ichi Sawafuji. Pénalisé par l'utilisation de rubans ne supportant pas de courants très élevés, ce type de transducteur restait dans l'ombre. Jusqu'au jour où un ruban plus résistant vit le jour.

Auparavant, par manques de moyens pratiques, cette technologie n'avait pu être appliquée aux haut-parleurs électrodynamiques à membrane plane et ruban déposé ou imprimé. De longs efforts de recherche furent nécessaires pour trouver une solution capable de supporter une puissance de 50 à 100 watts. Le problème de dissipation thermique restant le même pour ces diverses variantes.

Les nombreuses variantes possibles pour la disposition des aimants, ainsi que pour leur orientation, ont déjà été citées. Un aimant placé en longueur peut être polarisé en hauteur où en épaisseur. Dans le cas du haut-parleur français Orthophase, décrit plus loin, les aimants sont magnétisés dans le sens de l'épaisseur et il

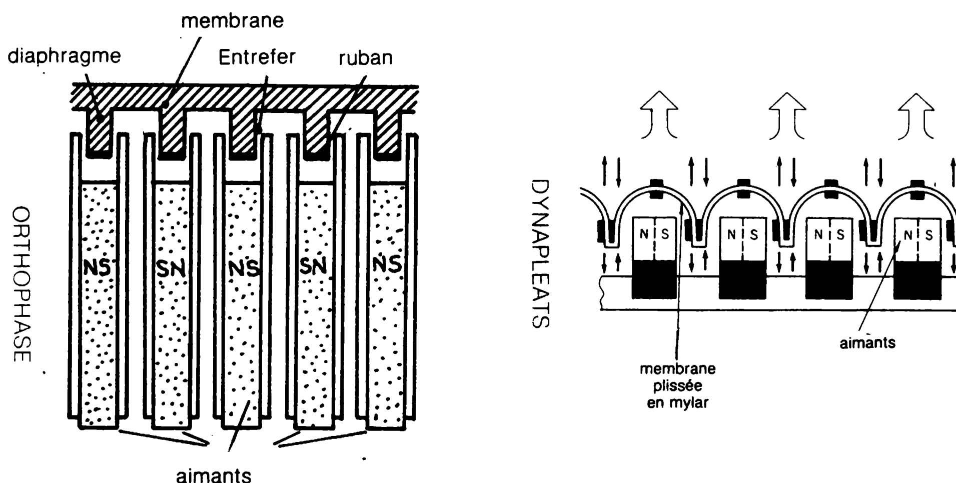



*Fig. 81: Variante dans la disposition des aimants sur le haut-parleur Orthophase et sur le haut-parleur Dynapleats.*

est fait usage de pièces polaires. Dans le haut-parleur Dynapleats les aimants sont aussi polarisés en épaisseur, mais leur disposition est différente de celle de l'Orthophase.

On voit les différentes variantes possibles, tirées du même principe. La figure 81 montre la différence de disposition des aimants sur le haut-parleur Dynapleats par rapport au modèle Orthophase.

Sur la figure 82 on voit l'aspect en coupe de ce haut-parleur. Son nom « Dynapleats » vient de sa membrane plissée, qui se meut en piston, grâce à une suspension, elle-même plissée (du mot grec « dunamis » qui signifie puissance, force, mouvement et « pleats » voulant dire plis en anglais). On voit que, contrairement à l'Orthophase, il n'est pas fait usage de pièces polaires. Les aimants sont placés

côte à côte et fixés à leur base sur un chassis très rigide. Suivant la disposition de ces aimants, on voit qu'entre les aimants les polarités sont contraires (ce qui n'est pas le cas de l'Orthophase) mais, qu'au-dessus, les polarités sont toujours contraires, bien qu'inversées par rapport aux premières. L'originalité du système Dynapleats réside dans son quadruple ruban : quatre circuits en zig-zag superposés deux à deux, sont mis en parallèles deux à deux. Le haut-parleur Kagéyama n'utilisait qu'un ruban dans l'entrefer. Ici, grâce à un ruban de 100 microns d'épaisseur, de haute tenue en température, laminé, collé sur une membrane de 50 microns en film spécial, très résistant à la chaleur (sans doute du « polyimide »), deux rubans peuvent être utilisés. Découpés en méandres par un procédé photo-chimique, ces rubans, mis en parallèle sont reliés à deux autres rubans, situés de part et d'autre de la membrane, de manière à être placé au sommet des plis formés par cette membrane.

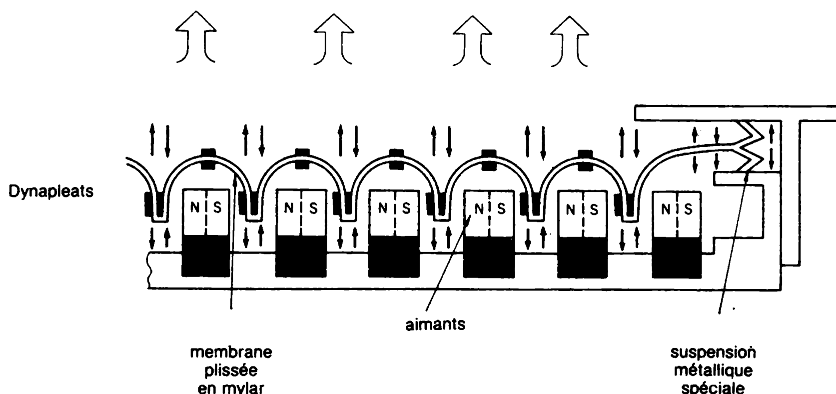



*Fig. 82 : Vue en coupe du haut-parleur japonais Dynapleats.*
*Remarquer l'ingénieuse disposition du ruban conducteur, placé au-dessus des aimants et entre ceux-ci, permettant d'obtenir une impédance de 8 ohms pour une seule cellule.*

Cette disposition est très avantageuse pour le rendement car on utilise non seulement les champs magnétiques entre les aimants, mais aussi les champs de fuite situés au-dessus des aimants. Autre avantage technique : les sommets des plis mûs en même temps par les rubans vont donner à l'ensemble un déplacement en piston relativement homogène. Le haut-parleur Kagéyama était aussi fait de plis mais les rubans perpendiculaires par rapport aux plis de la membrane n'avaient pas d'action sur le dessus des plis. Il s'agit donc ici d'une technologie originale, bien qu'inspirée du Blatthaller. La suspension du « Dynapleats » est particulièrement bien étudiée. Elle a une forme curieuse, qui lui assure une très bonne linéarité de souplesse et une large amplitude de déplacement. Cette suspension est réalisée à partir d'un sandwichage de papier japonais et de film de titane pressé. Cette suspension n'est pas périphérique, mais disposée seulement sur deux côtés. Sur les deux autres la membrane est fixée directement, à l'aide d'un pli, sur le châssis.

Dans un sens le déplacement se fait en piston, alors que dans l'autre sens il se fera en flexion. Malgré son aspect, il ne faut pas confondre ce principe avec celui du « transformateur acoustique » du « Docteur Heil» décrit plus loin.

La réalisation commerciale du Dynapleats donnait un transducteur de forme rectangulaire, 100 × 150 cm, très plat (2 cm). Il avait un rendement moyen de 90 dB/mW grâce à l'emploi d'aimants ferrite anisotropiques (structure orientée).

Comme pour la majorité de ces haut-parleurs à ruban « imprimé », il est facile d'obtenir une impédance standard de 8 Ω. La caractéristique d'impédance est pratiquement résistive pour presque tous ces transducteurs. La bande passante (représentée sur la figure 83) est très linéaire jusqu'à 12 kHz, puis chute légèrement. Il s'agit ici d'un transducteur large bande. Un modèle tweeter pourrait être conçu en réduisant l'épaisseur de la membrane et en réduisant la surface rayonnante. La caractéristique de directivité a l'allure d'un « 8 » et, dans l'aigu ,la directivité est moins marquée qu'avec une membrane fonctionnant en piston. Ceci provient certainement de la diffusion spatiale (dans un seul sens) créée par les plis. La réponse dans le grave est améliorée par un montage sur baffle. Bien qu'un seul transducteur puisse déjà supporter une puissance de 100 W il est toujours possible de monter plusieurs éléments en parallèle.

Un point intéressant pour ce haut-parleur, commun avec le modèle Kagéyama : la position des rubans moteurs placés dans les entrefers forme avec la membrane un angle d'attaque relativement fermé (10 à 15 ° au lieu de 120 à 130 ° sur un haut-parleur conventionnel du type Rice Kellogg). Grâce à ce principe, la rigidité mécanique de la membrane a moins d'importance.

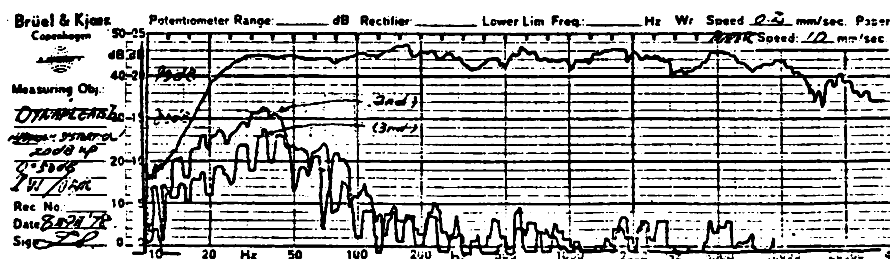



*Fig. 83 : Bande passante du haut-parleur Dynapleats.*
*Remarquer l'excellente linéarité.*

Quatre rubans étant utilisés, le rapport surface motrice/surface mue peut paraître très important. Il faut en fait tenir compte que, vue du dessus cette surface est beaucoup plus réduite et correspond à la vraie surface motrice.

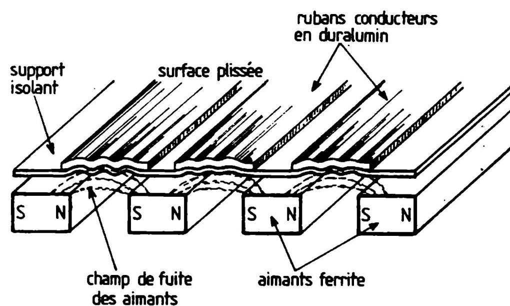
La membrane en mylar, pressée à chaud, acquérait déjà une certaine rigidité par ses plis. En outre l'épaisseur assez importante (0,1 mm) des rubans venait renforcer cette rigidité. Malgré tout, lors d'excursions importantes de la membrane il peut se faire un léger déplacement latéral des conducteurs moteurs. Sur le Dynapleats l'entrefer ne peut être réduit à une valeur inférieure à 2 mm. Cet effet est heureusement réduit par la tension mécanique exercée sur la membrane dans le sens des plis, qui atténue l'effet de roulis et le flottement latéral des rubans dans les entrefers.

Etant un des plus récents transducteurs basés sur le Blatthaller, le Dynapleats, malgré un faible succès commercial, reste un haut-parleur très intéressant et certainement perfectible. Sur les transducteurs plans de ce genre la rigidité du chassis est encore plus importante que pour les haut-parleurs à membrane et bobine mobile car il n'y a pas un seul entrefer, mais plusieurs. Ainsi un chassis qui ne serait pas assez rigide peut prendre du « voile » lors de sa fixation sur le baffle et dérégler les entrefers. Il s'ensuivrait un frottement des conducteurs mobiles sur les aimants. La plupart des membranes transparentes où translucides, permettent d'examiner les entrefers et éventuellement d'effectuer un réajustement de la position des conduteurs dans l'entrefer.

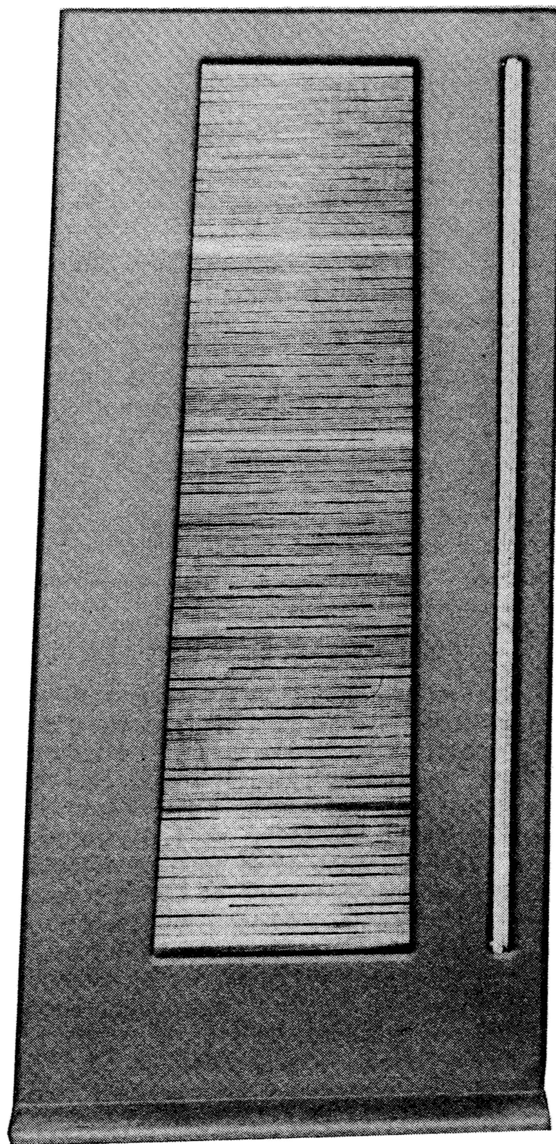
### Le haut-parleur à ruban large bande

La firme américaine Apogée Acoustics a été la première à commercialiser, à partir de 1983, un haut-parleur à ruban large bande. Conçu par les ingénieurs Jason Bloom et Leo Spiegel, ce haut-parleur à ruban reprend le principe du Blatthaller modifié par Stanley Kelly mais sous une beaucoup plus grande surface rayonnante avec de puissants aimants ferrite de grandes dimensions orientés de façon différente de celle des haut-parleurs plans Magneplanar. Le haut-parleur Magneplanar a été mis au point par James Winey de la firme Magnepan en 1969. Profitant de son expérience dans le domaine des aimants souples de la firme 3M, chez qui il avait travaillé, James Winey décidait d'utiliser ces aimants souples sur ses haut-parleurs. Bien que moins puissants que les barreaux d'aimants ferrite traditionnels, les aimants souples présentent l'avantage de ne pas être cassants (des débris d'aimants ferrite pouvant facilement percer la membrane ou créer d'importantes distorsions) et de faciliter considérablement le montage. Les rangées d'aimants doivent en effet être alignées et collées sur une plaque perforée en métal ferreux. De ce fait, la moindre torsion de la plaque pourrait briser ou décoller un ou plusieurs aimants ferrite. Le principe « Planar » de Magnepan associe les avantages du prix de revient et du poids peu élevés, de la robustesse mécanique, le rendement étant bas mais acceptable. Depuis leur commercialisation, plus de 50 000 paires de MG II et MG III ont été vendues grâce à leur excellent rapport performances/prix. Plus récemment, ces séries ont été perfectionnées et complétées d'un tweeter à ruban de hauteur 1,52 m. Les très nombreux dépôts de brevets concernant le haut-parleur à ruban et ses dérivés n'ont pas toujours été d'une protection vraiment efficace, la plupart d'entre eux n'étant que des variantes et des améliorations de principes déjà connus. Les principes Magneplanar et Apogée se rapprochent de celui du Blatthaller miniature de Stanley Kelly par le fait qu'il s'agit d'une seule rangée d'aimants près de laquelle se trouve une membrane sur laquelle est collé ou « imprimé » un ruban conducteur en zig-zag. Ils restent cependant différents au niveau de l'orientation des aimants. Tous deux utilisent les champs de fuite créés par les aimants mais ceux-ci peuvent être produits en alignant soit verticalement (Magneplanar) soit horizontalement (Apogée) les polarités N S de chaque aimant. Dans les deux cas, le pourtour de la membrane est fixé sur un cadre rigide, le déplacement de celle-ci s'effectuant en flexion plutôt qu'en vrai piston. Sur le système Apogée, les voies de médium et d'aigu reprennent intégralement le principe du transducteur à ruban, celui-ci étant disposé comme sur un microphone à ruban, mais sur une hauteur beaucoup plus grande. Le ruban étant gaufré en vue d'une plus grande flexibilité dans le sens de déplacement, la hauteur importante et des phénomènes d'appel d'air provenant de la proximité de la voie grave ont tendance à produire un « flottement » du ruban. Pour éviter que ses bords ne viennent toucher accidentellement les aimants, les rubans sont maintenus en plusieurs points.

La reproduction des fréquences graves à partir d'un transducteur à ruban pose plusieurs difficultés de réalisation. Apogée Acoustics est la première firme qui a réussi à surmonter celles-ci. Plusieurs critères sont contradictoires sur le plan de la réalisation. Une grande puissance admissible ne va pas de pair avec un rendement élevé ; de même que puissance admissible élevée et masse mobile très faible sont en contradiction. Le succès technologique (et commercial) de la firme Apogée Acoustics a certainement pour origine l'utilisation en grande quantité d'aimants puissants de grandes dimensions. Si les inconvénients de cette application sont le poids (la version Apogée pèse 140 kg) et le prix, le gros avantage est la possibilité d'étendre jusqu'aux fréquences graves un principe de transduction qui était réservé jusqu'ici aux fréquences élevées. En plaçant côte à côte plusieurs transducteurs à ruban conventionnels, il se poserait deux problèmes : celui de la surface perdue produite par la présence des pièces polaires ainsi qu'un autre beaucoup plus

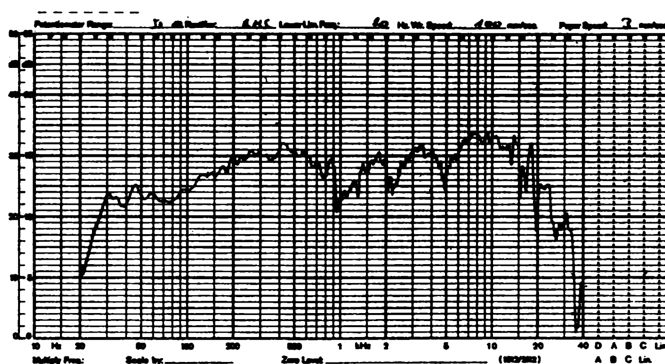



*Principe appliqué sur le haut-parleur à ruban Apogée. La membrane plissée comporte une métallisation en duralumin assez épaisse qui forme des méandres après l'opération de photogravure.*



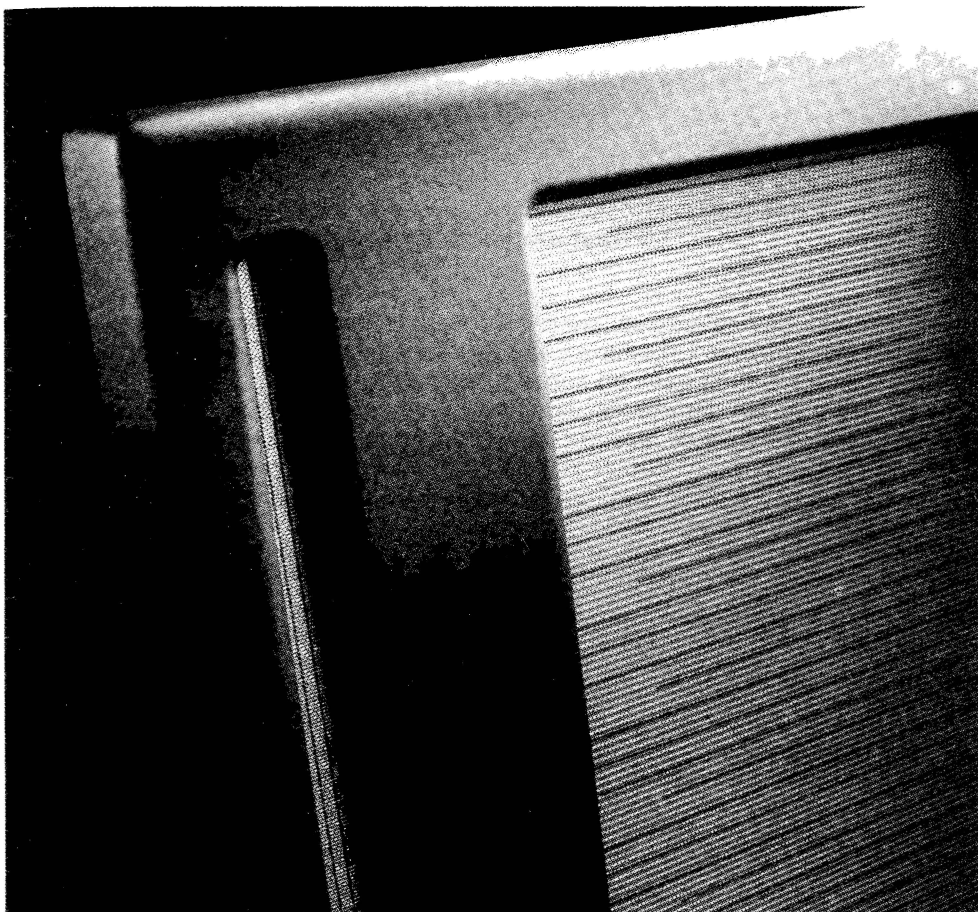
*Haut-parleur à ruban large bande Apogée Acoustics, version Duetta Series II.*

gênant, celui des fuites acoustiques au niveau des entrefers. La seule solution pratique reste donc celle de rubans disposés en zig-zag, solidaires d'une membrane placée dans le champ de fuite de plusieurs rangées d'aimants. Reproduire des fréquences très graves sous un niveau acoustique élevé implique une grande surface rayonnante, un écartement membrane/aimants assez conséquent ainsi que la mise en place d'une membrane légère, résistante à la température et relativement rigide. Apogée Acoustics a résolu ce problème en faisant appel à une membrane en duralumin plissé comportant une série de découpes parallèles de façon à former un ruban en zig-zag.



*Courbe de réponse amplitude/fréquence, dans l'axe, du haut-parleur à ruban Apogée, pesant près de 140 kg. Noter l'étendue de la réponse en fréquence dans l'extrême-grave. La coupure basse se situe vers 25 Hz.*

L'étanchéité et le maintien des rubans ont été obtenus en prenant pour base un film de polyimide, très résistant à la température, couvert d'une épaisse métallisation, la photogravure suivie d'un pressage lui donnant cet aspect de ruban gaufré de forme trapézoïdale. Cette forme évite la multiplication des défauts en produisant des résonances plus diffuses, ce qui améliore la linéarité de la réponse en fréquence. Grâce à plus de 100 kg d'aimants par panneau, la version Apogée est capable de reproduire sous un niveau acoustique confortable et sans distorsion audibles des fréquences aussi basses que 30 Hz. Bien que peu élevé, le rendement de ce haut-parleur reste acceptable, son point fort étant sa tenue en puissance remarquable. L'inconvénient de ce type de transducteur est sa très basse impédance (1 Ω environ) ce qui nécessite soit l'insertion d'un autotransformateur adaptateur d'impédance soit l'adaptation directe d'un amplificateur conçu spécialement pour travailler à haute puissance sur des charges de cet ordre de valeur. Les haut-parleurs à ruban Apogée Acoustics sont bi-amplifiables, ce qui permet de choisir les amplificateurs remplissant ces conditions. L'étendue de la réponse aux basses fréquences de la version Apogée est étonnante (coupure basse située vers 25 Hz), de même que ses performances en réponse transitoire.



*Vue de détail d'un haut-parleur à ruban large bande Apogée Caliper "Signature". Remarquez le système à rubans parallèles multiples pour la voie médium-aiguë ainsi que la membrane gaufrée de l'élément grave sur lequel on aperçoit les découpes horizontales de la surface conductrice, formant ainsi un ruban replié en zig-zag derrière lequel prennent place les rangées de puissants aimants ferrite.*

## Le haut-parleur Orthophase

Ce haut-parleur, fort original, dont l'invention remonte aux années 1960/61 a fait couler beaucoup d'encre. Célèbre dans le monde entier grâce à sa conception originale, il connut des années de succès, spécialement en France.

Avant d'entrer dans les détails, il convient, pour mieux le situer dans son histoire, de se référer au tableau de la figure 84. Dérivant du haut-parleur à ruban de Gerlach

1929 - Janvier 1923, transducteur à ruban, par E. Gerlach
1923 - Juin 1923, « Blatthaller » primitif, par H. Riegger
1926 - Haut parleur à ruban « Falten »
1929 - Haut-parleur « Riffel »
1930 - Haut-parleur « Blatthaller » amélioré, par Mac Lachlan
1930 - Haut-parleur électrodynamique plan par R.W. Paul, B.B. Cohen
1948 - Haut-parleur « Kagéyama »
1958 - Haut-parleur « Gamzon », par R.R. Gamzon et E. Frei
1959 - Haut-parleur « Blathaller miniature » par S. Kelly
1961 - Haut-parleur Orthophase, par M. Poutot et G. Gony
1961 - Haut-parleur dynamique plan, par Wharfedale, Jensen
1962 - Haut-parleur dynamique plan, par Westinghouse
1962 - Haut-parleur dynamique plan, par Pioneer
1962 - Microphone (reversible) Socapex
1963 - Haut-parleur dynamique plan KEF, Sharp
1966 - Haut-parleur dynamique plan Yamaha
1967 - Haut-parleur dynamique plan Shodensha
1967 - Haut-parleur Polyplanar
1971 - Haut-parleur dynamique plan Nikkei Denshi, Fisher
1971 - Haut-parleur Magnéplanar, Casque Wharfedale Isodynamiquc
1975 - Haut-parleur plan BES
1975 - Haut-parleur Kagéyama amélioré
1976 - 1980 - Haut-parleurs plans dynamiques à structure nid d'abeille

*Fig. 84 : Haut-parleurs électro-dynamiques plans et leurs origines.*

(1923) du premier « Blatthaller » (1923) et du «Blatthaller » amélioré (1930), des idées apportées par le haut-parleur Gamzon, le « Blatthaller miniature de S. Kelly, il reste très proche du Blatthaller ou du Kagéyama. Il utilise également une surface motrice importante, pratiquement égale à la surface émissive. Tout comme ces transducteurs, il possède un diaphragme rigide, se déplaçant en piston. La position des conducteurs mobiles est cependant différente de celles du Blatthaller ou du Kagéyama.

Placés verticalement sur le Blatthaller et le Kagéyama, ils sont cette fois à plat, comme le vrai haut-parleur à ruban. C'est, en quelque sorte, une multitude de haut-parleurs à ruban disposés en parallèle, dans lesquels les rubans supportent un

diaphragme rigide se déplaçant en bloc. Les surfaces motrices et émissives sont ainsi considérablement augmentées, ainsi que la rigidité du support, au détriment toutefois du rendement, à cause des entrefers beaucoup plus larges. Les matériaux utilisés et les dimensions du diaphragme en font un transducteur à très large bande passante. Sa fréquence de résonance était voisine de 40 Hz et il pouvait atteindre, selon Poutot et Gogny, la fréquence de 25 kHz.

Le haut-parleur Orthophase, dont le but technologique était d'obtenir une très large bande passante ainsi qu'une parfaite réponse en phase, utilisait une membrane légère, rigide, mue en tous ses points avec une même force. Elle effectuait un travail proche du piston des fréquences les plus graves aux plus élevées. Cette réalisation datant de 1960 et 1961 est due à Messrs. Poutot et G. Gogny. Elle fut rapidement adoptée par les fervents de haute fidélité bien que conçue à l'origine pour une utilisation professionnelle.

## Description

La membrane de ce haut-parleur utilise le polystyrène expansé. Ce matériau, à la fois léger et rigide, eut son heure de succès vers 1960. Plusieurs constructreurs tentèrent de l'utiliser, notamment pour la confection des diaphragmes coniques (Mirrorphone, Leak « Sandwich », Kef, Gégo, etc.). Après une sélection d'homogénéité, réalisée selon une méthode d'examen par transparence, il est découpé en feuilles minces de 8 mm d'épaisseur. Ces feuilles sont ensuite redécoupées en bandes de 10 cm de large. Après cette opération de dégrossissage vient la découpe à la fraise. Grâce à une série de meules placées côte à côte, des rainures sont alors effectuées dans l'épaisseur du matériau. Pour cette opération, il suffit de passer les bandes prédécoupées dans un gabarit dans lequel sont placées les meules. De l'autre côté du gabarit il sortira ainsi des bandes dont le dos sera constitué d'une succession de rainures. Cette opération est délicate, car la matière est friable et elle entre facilement en vibration lors du passage d'une meule, ce qui fausse alors la découpe. Cette méthode est celle qu'utilisa Georges Gogny pour ses fabrications en petite série, dans la cadre de la société française Gégo. Il préférait cette méthode à celle du moulage, cette dernière provoquant, selon lui, des résonances parasites plus marquées et moins dispersées. Il en sera question un peu plus loin. Pour en revenir à ces rainures, on en comptait 16 sur les premiers modèles, puis seulement 12 ensuite : cette modification sur les modèles parus ultérieurement venait de l'utilisation d'aimants ferrites plus larges et plus puissants, montés en structure ajourée (meilleur dégagement de l'onde arrière). Ces rainures avaient pour largeur 5,5 mm et leur profondeur était de 7 mm, ce pour les modèles améliorés. Sur les premiers modèles, les aimants moins larges et plus nombreux donnaient des rainures de 4,5 × 6 mm.

Une fois ces rainures terminées, les bandes, de 10 cm de largeur (sur 1 à plusieurs mètres de long) étaient à nouveau découpées en portions de chacune 10 cm. Ainsi, on obtient des diaphragmes de dimensions 10 × 10 × 0,8 cm.

Ces rainures donnent à la membrane un profil similaire à une succession de T. On comprend aisément que cette structure rend la membrane moins rigide dans un sens que dans l'autre. Pour ce faire, on augmente la rigidité de l'ensemble en collant sur deux cotés (tranches où les successions de T sont visibles) deux petites feuilles de polystyrène expansé.

On colle ensuite, à l'aide d'un gabarit, une feuille d'aluminium sur les sommets des parties striées. Cette feuille d'aluminium comporte des fenêtres prédécoupées, dégageant les parties fraisées. Ce n'est qu'après cette opération que se fera la découpe de petites portions des deux bords de cette feuille. On passe ainsi, grâce à cette opération de découpe, de la forme à longues fenêtres prédécoupées à la

forme en « zig-zag ». Cette opération provient sans doute du fait que, si le ruban en méandres était prédécoupé, il aurait été plus difficile à manier avant l'opération de collage. Mais ici, d'autres méthodes plus pratiques sont très certainement applicables. Préalablement, la feuille d'aluminium possède deux coins soudés à des fils de connexion. La soudure est délicate, vu qu'il s'agit de l'aluminium. A ce sujet, il existe sur le marché plusieurs soudures spéciales pour l'aluminium, dont certaines peuvent être utilisées sans décapage préalable. Certains résidus de flux, après soudure, sont particulièrement corrosifs et il faut alors procéder, après chaque soudure, à une opération de nettoyage.

D'autres méthodes consistent à plonger la pièce à souder ou à étamer dans un bain de soudure soumis à des vibrations situées en 18 et 23 kHz (ultra-sons). Cette méthode de soudure ultra-sonique, bien connue pour son excellente fiabilité par Wharfedale par exemple, est utilisée depuis de nombreuses années. Les pièces à étamer voient ainsi leur couche d'alumine se détériorer rapidement par cette opération. Les pièces étant plongées dans le bain de soudure (donc à l'abri de l'air), elles s'étament parfaitement dès que la couche d'alumine a disparu. On trouve encore sur le marché certains fers à souder dits « ultra-soniques », reposant sur le même principe. On reproche souvent aux soudures sur aluminium leur faiblesse en termes de robustesse mécanique. Ces questions ont déjà été discutées dans ce livre. Parmi les soudures disponibles sur le marché, ne nécessitant que l'utilisation d'un fer à souder courant (mais de température soigneusement ajustée et de wattage assez élevé) il existe une version particulièrement bonne, proposée en 1979 par la firme anglaise Multicore : la soudure « Alusol 45D », très efficace et stable dans le temps, dont la grande robustesse mécanique et la fiabilité viennent du fait qu'elle possède un effet d'amalgame procurant une variation moins brutale d'un métal sur l'autre. Elle demande seulement un nettoyage des résidus de flux après chaque soudure, ce qui peut être fait d'ailleurs simplement avec de l'eau.

Cette parenthèse sur le problème de la soudure sur aluminium provient du fait que le haut-parleur Orthophase posait parfois des ennuis de ruptures mécaniques de connexion à ces endroits où, justement, les flexions sont les plus grandes (au niveau des suspensions). A présent, l'évolution technologique dans les soudures spéciales fait qu'il n'y aurait désormais plus aucun problème de ce côté.

Les fils de connexion, enfin soudés, étaient reliés aux bornes du haut-parleur.

Les suspensions étaient collées aux deux extrémités de la membrane, perpendiculairement aux rubans moteurs. La mousse de polyuréthane utilisée pour les premiers modèles fut ensuite remplacée par du tissu gaufré. La mousse de polyuréthane possède en effet le facheux inconvénient d'avoir tendance à se désagréger assez rapidement (3 à 5 ans). Comme cette double suspension ne peut supprimer l'effet caractéristique de roulis, le sens du collage de ces suspensions est choisi de telle façon que le centrage des rubans dans les pièces polaires ne s'en trouve pas gêné. Ces suspensions laissent par contre deux côtés non étanches. Afin de limiter les fuites acoustiques qui s'y créent, des plaques de duralumin entourent le diaphragme. Ces caches éliminent également une partie des résonances parasites et améliorent l'isolement acoustique avant/arrière de la cellule. On observe souvent que les suspensions des haut-parleurs, dont la surface émissive n'est pas négligeable, peuvent, à certaines fréquences, se mouvoir hors-phase par rapport au mouvement même de la membrane. Elles ajouteront alors des irrégularités dans la courbe de réponse. Sur l'Orthophase, il n'apparaît donc que la surface active du diaphragme (10 × 10 cm). Cependant, G. Gogny considérait qu'aux basses fréquences une partie de la suspension pouvait être considérée comme une surface active, ce qui donnait en conséquence une surface active réelle de 10 × 13 cm.

Le circuit magnétique utilise deux aimants par ruban, aimants dont la structure est « anisotropique » (structure orientée). Les modèles plus récents utilisèrent qua-

tre aimants par ruban. De 3 mm sur les premiers modèles, la largeur de ces aimants passa à 5 mm sur les modèles perfectionnés. Sur ces derniers, les quatres aimants par ruban permettaient d'ajourer l'entrefer, laissant ainsi quelques millimètres entre les aimants. Ceci donnait un meilleur dégagement de l'onde arrière, un problème classique de la famille des transducteurs électro-dynamiques plans. Il se retrouve dès le premier Blatthaller où l'ombre acoustique des bobines d'excitation était déjà importante. Ces aimants étaient placés entre deux plaques de champ, en fer pur « Armco ». Ces armatures dépassaient d'un côté des aimants, ce qui procurait des cavités de 6 mm de profondeur. Dans ces cavités longitudinales un champ magnétique uniforme était ainsi obtenu, grâce aux champs de fuite des aimants.

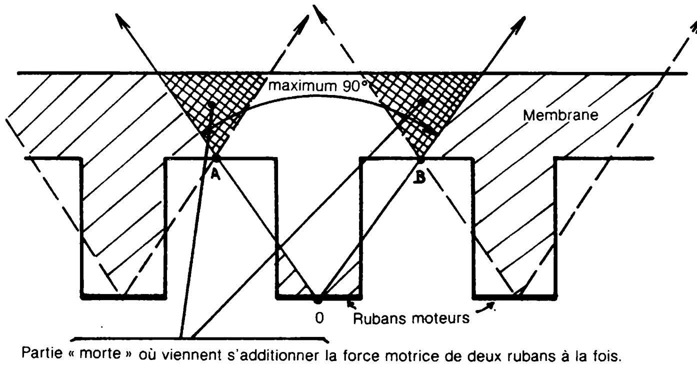



*Fig. 85 : Coupe du diaphragme Orthophase, montrant que pour un angle AOB inférieur à 90° on peut considérer que la structure en assemblage de « T » parallèles donne une bonne rigidité, ce qui permet de considérer la surface de la membrane comme étant mue en tous ses points avec la même force.*

On comptait 17 rangées d'aimants sur les premiers modèles. Par la suite, ce nombre fut ramené à 13. Le champ coercitif de ces aimants ferrite était de l'ordre de 0,275 Tesla (2 750 Gauss).

Si l'on considère que les aimants, utilisés ici sur un transducteur plan, sont soumis à un champ de démagnétisation intense, cette valeur faible représente en fait un bon compromis. Cependant, n'oublions pas les propos de Mac Lachlan à propos de la réponse transitoire et de la puissance du champ magnétique. Sur ce point, le véritable Blatthaller reste considérablement supérieur (ses électro-aimants produisaient 20 000 Gauss dans les entrefers, ceci au prix d'une consommation de près de 1 kW).

On notait une résonance parasite vers 2-3 kHz. Cette résonance, créée par effet de cavité (air pris entre les rubans et les pièces polaires), était corrigée par un filtre passif LRC (filtre anti-résonnant amorti). Par la suite, l'écoulement de l'air fut amélioré, et les résonances diminuées. Les technologies actuelles de la taille des aimants permettraient d'ailleurs de faire d'autres progrès grâce à des formes encore mieux adaptées (rondes où ovales). M. Poutot et Gogny, au sujet de l'assemblage des « poutres en T », démontrèrent que si l'angle AOB était inférieur à 90° (figure 85) la surface rayonnante du diaphragme (surface externe) pouvait être considérée comme étant mue sur 100 % de sa surface.

Cette condition n'est remplie entièrement que par le haut-parleur à ruban. Dans le cas de l'Orthophase, la surface motrice (formée par les rubans en zig-zag) ne correspond qu'à 34 % de la surface totale. Seule la rigidité élevée du matériau renforcée par le profil des jambages (succession de T) permet de dire que le diaph-

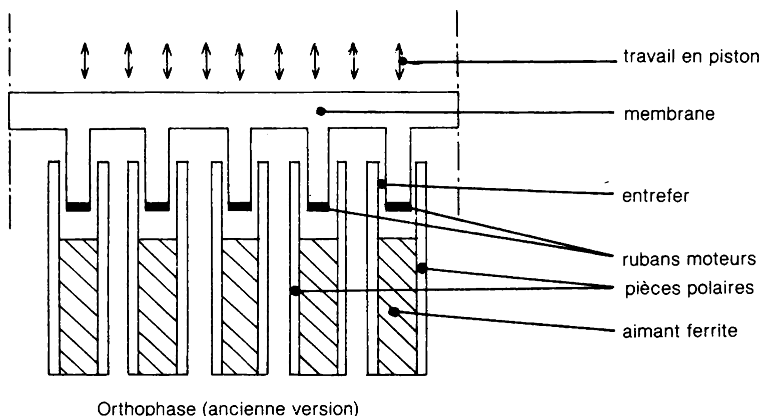



*Fig. 86 : Orthophase (ancienne version)*

ragme est mû en tous ses points. La figure 85 montre que les zones mortes (ou le ruban moteur est absent) recoivent indirectement une poussée. Cette poussée est la résultante de deux forces latérales et doit se faire sous un angle inférieur à 40°. En théorie la compensation devrait être suffisante. En pratique, la rigidité mécanique du diaphragme n'est pas parfaite en tous ses points, mais le compromis reste bon. Par son principe de fonctionnement même, ce haut-parleur est l'un des seuls qui puisse prétendre à une technologie aboutissant efficacement à un travail en piston. Grâce à une membrane très légère, mais très rigide, recevant une même force en tous ses points, ceci se vérifie, en plus, à pratiquement toutes les fréquences. En pratique il existait bien quelques problèmes de linéarité qui auraient pu sans doute être maîtrisés par la suite.

En comparaison, le classique haut-parleur de Rice-Kellogg ne peut prétendre accéder même en théorie, à de telles performances. Le simple fait que sa surface motrice soit très nettement inférieure à sa surface rayonnante entraîne un travail dynamique en piston imparfait : des phénomènes de vibrations parasites du diaphragme vont limiter ses performances, malgré l'utilisation de cônes extrêmement rigides.

La figure 86 montre une coupe de l'Orthophase, première version et la figure 87

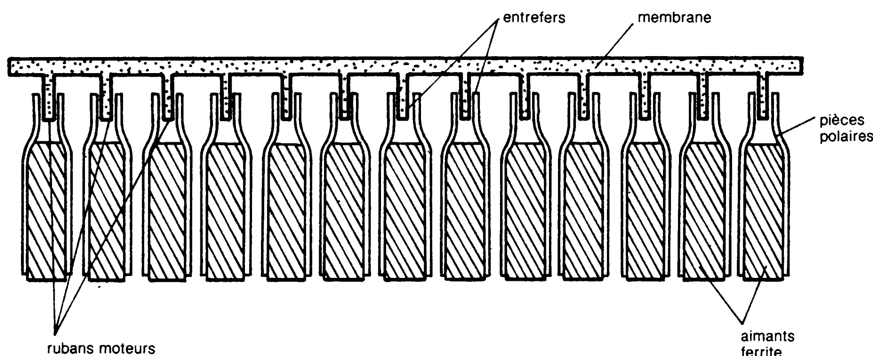



*Fig. 87 : Orthophase (seconde version)*

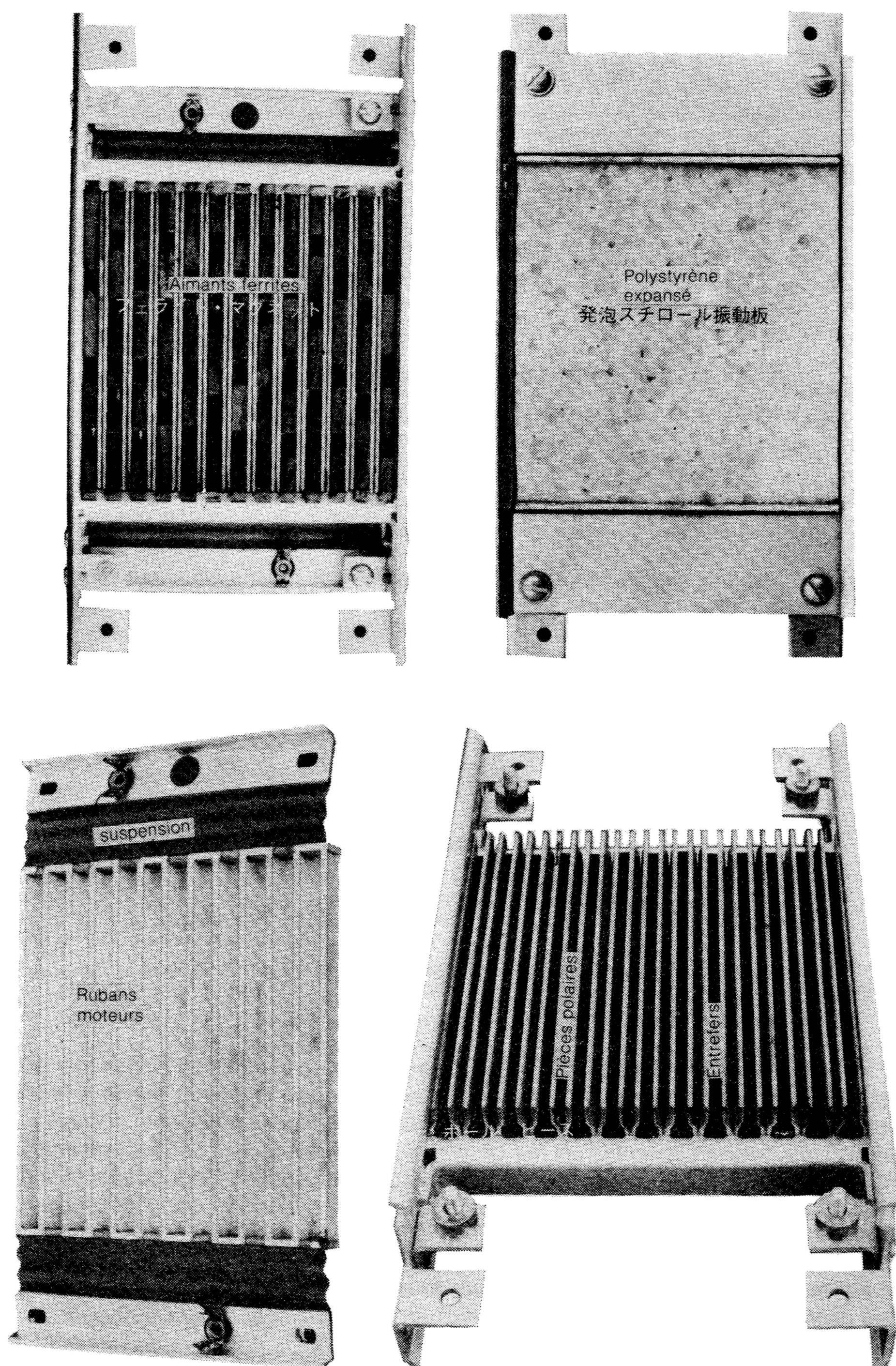
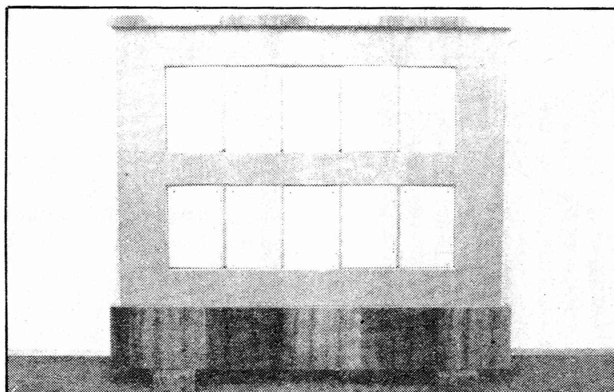



*Fig. 88 : Orthophase, seconde version détails de la membrane et du circuit magnétique.*

la version ultérieure. Les aimants sont plus puissants et plus larges, le dégagement acoustique arrière amélioré. La figure 88 montre l'aspect général du modèle amélioré.



ORTHOPHASE. Vue d'un ensemble monté sur baffle plan contenant dix cellules.

| Nature du matériau | Module d'Young (E) (dyne/cm²) | Masse spécifique (d) (g/cm³) | $E/d^3$ |
|---|---|---|---|
| Acier .................. | $20 . 10^{11}$ | 7,7 | $4.3 . 10^{9}$ |
| Aluminium ............ | $7 . 10^{11}$ | 2,7 | $23 . 10^{9}$ |
| Magnésium ............ | $4 . 10^{11}$ | 1,7 | $80 . 10^{9}$ |
| Polystyrène ............ | $3,5 . 10^{10}$ | 1,1 | $25 . 10^{9}$ |
| Pulpe de cellulose pour diaphragme de haut-parleur (variété dure). | $2,8 . 10^{10}$ | 0,8 | $56 . 10^{9}$ |
| Pulpe de cellulose pour diaphragme de haut-parleur (variété molle) | $1 . 10^{10}$ | 0,4 | $150 . 10^{9}$ |
| Polystyrène expansé .... | $35 . 10^{8}$ | 0,013 | $16\,000.10^{9}$ |

*Fig. 89 : Tableau montrant la masse spécifique, le module d'Young, le rapport $E/d^3$ (d'après Revue du Son, N° 97, P. 125)*

M. Rémy Lafaurie expose (article paru dans la Revue du Son n° 97 de mai 1961, pages 123 à 129) l'avantage du polystyrène expansé sur d'autres matériaux. Réunissant sur un même tableau (figure 89) les différents modules d'Young (en dyne/cm²) les masses spécifiques (en g/cm³) et le rapport $E/d^2$, il peut affirmer que le polystyrène expansé présente des avantages considérables. Cependant, la valeur de ce matériau reste « statique », car aux fréquences élevées son comportement vibratoire n'est plus aussi bon.

Sur l'Orthophase, l'amplitude vibratoire était limitée de 5 à 7 mm. Ce déplacement est malgré tout important, compte tenu de la taille de la membrane. Le ruban doit en outre travailler dans un champ magnétique uniforme. Pour l'Orthophase, ce champ avait une valeur de 0,275 Tesla (2 750 Gauss). Ce champ magnétique, issu du champ de fuite des aimants était « récupéré » par les pièces polaires qui dépassaient de chaque côté des aimants.

Le haut-parleur Orthophase était en général monté sur un baffle où étaient dispo-

sées et reliées en série plusieurs cellules. (Le tout était attaqué par un transformateur abaisseur d'impédance). Un filtre passif (anti-résonnant amorti) devait atténuer une irrégularité vers 2-3 kHz. La directivité de cet ensemble était prononcée, comme sur tous les haut-parleurs à diaphragme plan. La plupart de ces baffles avaient une forme en portion de cylindre afin d'améliorer cette caractéristique.

Malgré l'utilisation d'un baffle simple, le poids d'un ensemble de 24 cellules était assez important (30 kg). Certains modèles ont été conçus pour ne reproduire que les fréquences supérieures à 200 ou 300 Hz. Le « flottement », (débattement non contrôlé des membranes) phénomène bien connu de ses utilisateurs, était ainsi réduit. Dans ce cas, les fréquences basses étaient reproduites par un haut-parleur dynamique conventionnel également monté sur baffle.

## Possibilités futures

Le haut-parleur Orthophase a connu ses années de succès. Il a cependant disparu avec sa firme, il y a quelques années. Récemment, la fabrication de ces cellules a repris en France (firme Spitéri). Il est possible que ce haut-parleur regagne un succès qui ne serait que mérité.

Il existe de nombreuses variantes, souvent parues après 1960 : prototypes, modèles déposés ou même brevets d'invention. Ces variantes concernent soit la disposition des aimants, soit la forme de la membrane, la disposition et la structure des suspensions. D'autres améliorations concernent les rubans moteurs, et voient le remplacement d'un unique ruban par un montage en série de deux ou trois rubans, placés côte à côte. Ceci est rendu possible par une technologie à présent

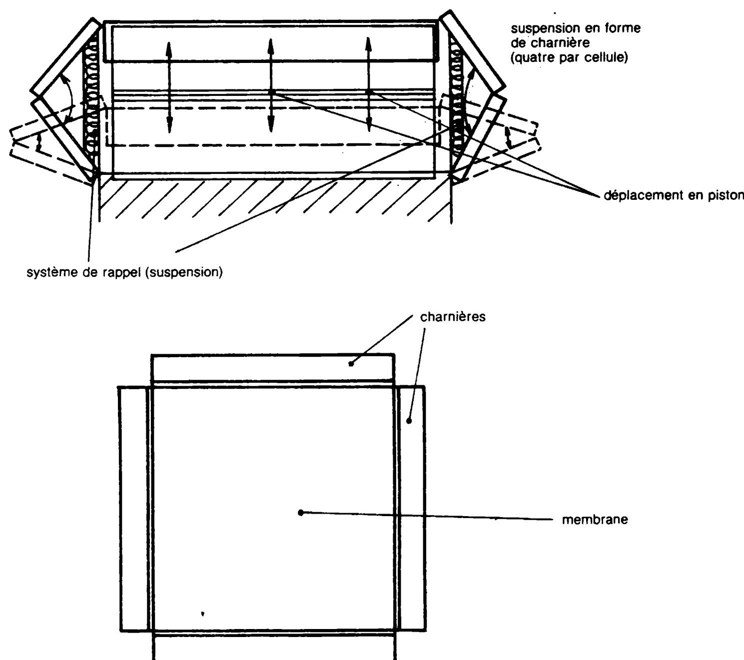



*Fig. 90 : Exemple de suspension « semi-rigide » basée sur le principe de charnières placées à 90° l'une par rapport à l'autre et donnant au diaphragme un déplacement en piston sans risque d'effet de « balancement » (appelé aussi « roulis »). Le défaut de cette suspension est d'être une réalisation difficile (devant être légère) et onéreuse (matériaux spéciaux).*

parfaitement au point, permettant d'utiliser des films et des pistes imprimés de grande robustesse mécanique et thermique. Toujours à propos de ces conducteurs mobiles, la même méthode permet de les superposer, soit pour augmenter l'impédance de la cellule, soit pour placer, exactement au même endroit que les rubans moteurs, un second circuit, utilisé, par exemple, pour l'asservissement.

L'asservissement sur une telle cellule est très intéressant car le haut-parleur par lui-même se prête mieux qu'un haut-parleur conventionnel à un asservissement efficace. La surface totale de la membrane est, en effet, contrôlée, au lieu d'une infime partie de celle-ci, comme pour les haut-parleurs dynamiques courants.

La suspension de l'Orthophase posait quelques problèmes gênants. Victime d'un effet de roulis, elle était, en outre le siège de fuites acoustiques. Cet effet de roulis était très important du point de vue mécanique (en appuyant verticalement sur un coin de la membrane le côté opposé de celle-ci remontait). Il est cependant dynamiquement atténué lors de faibles signaux par le principe même de l'Orthophase. Cet effet de roulis, sensible aux fortes amplitudes, exige d'augmenter la largeur des entrefers, au dépit du rendement. Même si l'on supprime les frottements, cet effet de roulis, responsable pour une grande part de l'apparition de distorsion par harmonique 3 et impaire, reste toujours présent.

Certains brevets d'invention ont donc porté sur de nouvelles suspensions adaptées à ce transducteur. Ces systèmes, basés, par exemple, sur un principe de dou-

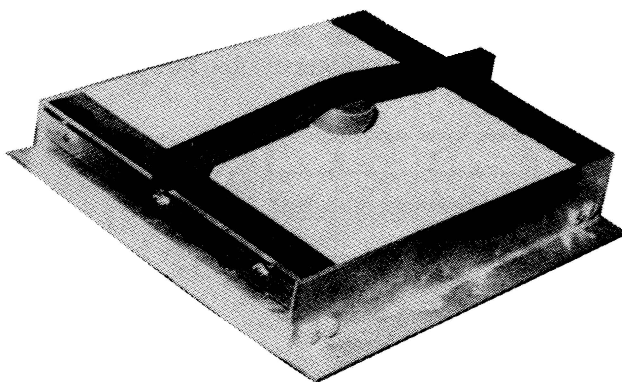


*Fig. 91 : Haut-parleur de grave expérimental basé sur le principe Orthophase (réalisation E. Spiteri, France)*

bles charnières placées à 90° l'une par rapport à l'autre, ne peuvent travailler qu'en piston. La figure 90 montre l'aspect très schématique de cette suspension. Faite de portions, soit très souples, soit très rigides, elle pourrait être baptisée « semi-rigide ». Les parties rigides s'opposent ainsi au mouvement de roulis. Autre avantage de cette suspension « anti-roulis » : on peut dissocier le système de rappel de la suspension elle-même : normalement, le système de rappel est confondu avec le système de centrage. Ils sont construit dans le même matériau (tissu gaufré, mousse plastique, etc.). Avec cette modification, il devient possible de séparer le travail de ces suspensions. L'une sert uniquement au centrage et empêche l'effet de roulis. L'autre, placée verticalement et dans le sens de déplacement de la membrane sert de force de rappel et ramène le diaphragme en position de repos après un signal. Cette technologie plus complexe, bien que soumise à des contradictions de légèreté, prix de revient et facilité de construction, devrait permettre à ce transducteur de devenir un système de reproduction aux performances poussées.

Ce transducteur peut, bien sur, être réalisé dans d'autres dimensions. Pour l'Orthophase, une membrane de dimensions 10 × 10 cm semble être un peu trop « ronde » pour être d'une cote optimum. Des essais ont été réalisés avec des dimensions plus grandes (comme sur la figure 91) pour des cellules destinées à reproduire les sons graves.

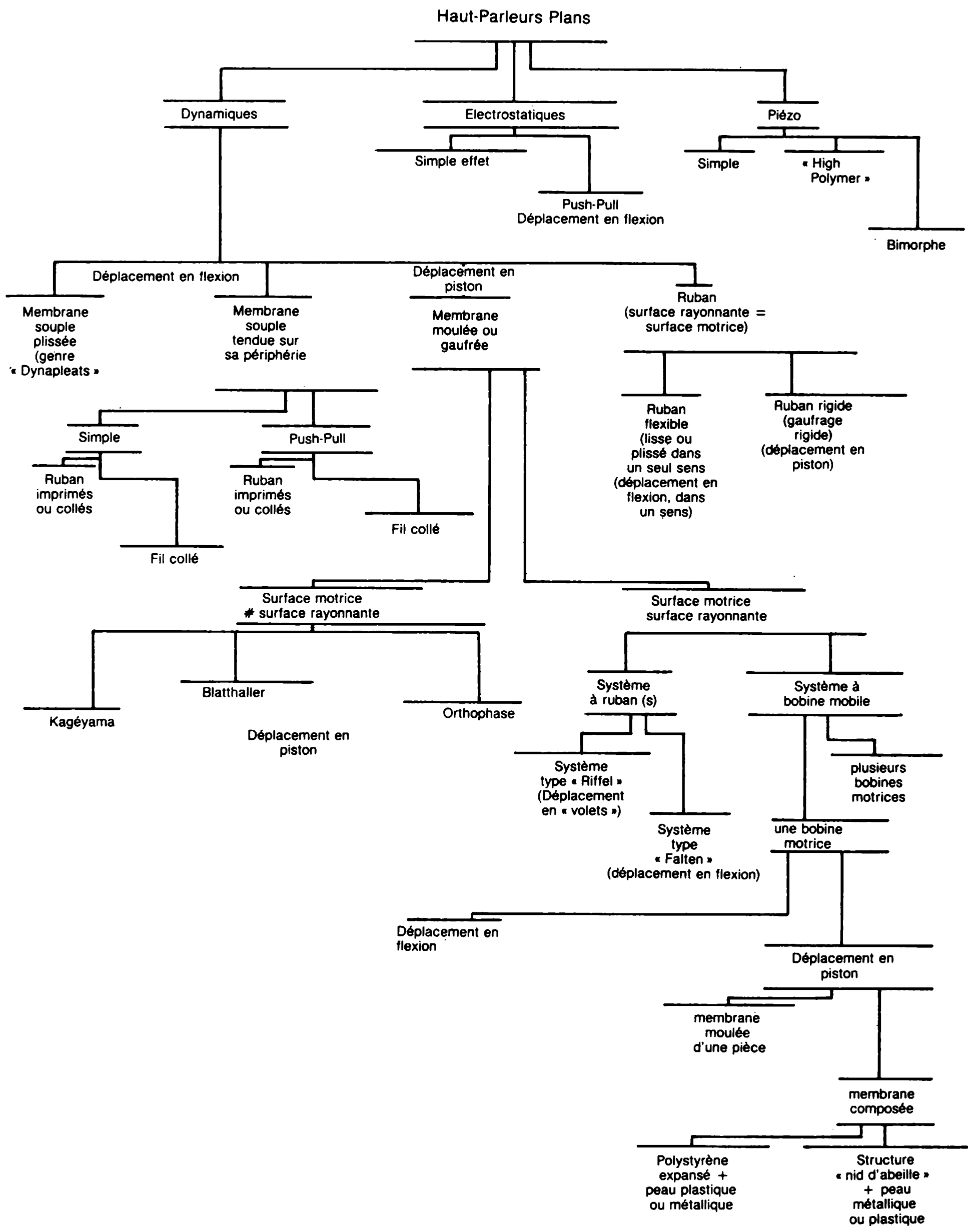



*Fig. 92 : Haut-parleurs plans*

Pour des cellules de petites dimensions, la construction devient beaucoup plus difficile. Le déplacement beaucoup plus faible de la membrane rend préférable à la technologie de l'Orthophase celle des systèmes Gamzon ou Magneplanars, d'ailleurs déjà largement appliqués sur des tweeters et plusieurs casques dynamiques.

Avant de terminer ce chapitre sur les haut-parleurs Orthophase il fallait aussi parler des petits problèmes techniques comme celui du collage, très important ici. Le poids de la membrane étant très faible (environ 0,5 g), le poids de la colle intervient d'une manière fâcheuse, en dispersant les caractéristiques. Les plus récentes techniques de découpe (par procédé photo-chimique) de films plastiques et pistes imprimées très résistantes à la chaleur pourraient permettre de réaliser un ruban (ou multi ruban) ajouré. Ce ruban comportant de nombreuses perforations pourrait être noyé lors « d'un moulage », dans la masse de la membrane. Cette masse serait ensuite rectifiée, afin de retirer la peau de surface. La suppression de cette « peau », surface lisse donnée par le moulage, donnant un meilleur résultat auditif,

| | |
|---|---|
| Force motrice — Haut-parleur de type Riffel (volets mobiles) utilisant une membrane métallique gaufrée. Déplacement en « volets » mobiles. — membrane rigide | membrane rigide — Force motrice — Haut-parleur à ruban rigide muni de suspension (genre Pioneer). Application limitée à la reproduction de l'aigu. Fonctionnement théorique pouvant être considéré comme pratiquement idéal : Déplacement en piston, membrane mue en tous ses points. |
| Force motrice — Haut-parleur à ruban utilisé couramment pour les tweeters. Déplacement en flexion — membrane souple | Force motrice — Haut-parleur genre « Dynapleats ». Déplacement en flexion — membrane souple |
| Force motrice — Haut-parleur genre Blatthaller ou Kagéyama. Membrane se déplaçant en bloc mais mue seulement en plusieurs points. Déplacement en piston. — membrane rigide | Force motrice — Haut-parleur plan à bobine mobile unique et membrane rigide (un ou plusieurs matériaux). Deplacement en piston. — membrane rigide |
| Force motrice — Haut-parleur Orthophase. Membrane se déplaçant en bloc et mue par une surface motrice importante. Déplacement en piston. — membrane rigide | Force motrice — Haut-parleur plan à plusieurs bobines mobiles et membrane à structure nid d'abeille. — membrane rigide |
| Force motrice — Haut-parleur genre Gamzon ou dérivés à membrane plane et fine et conducteurs collés ou imprimés. Déplacement en flexion. — membrane souple | Force motrice — Haut-parleur plan à bobine mobile unique et membrane réalisée en une seule pièce, suspension comprise. Fonctionnement en flexion. — membrane semi-rigide |

*Fig. 93 : Tableau plaçant par catégorie chaque haut-parleur plan*

peut être par une amélioration de la dispersion des résonances parasites du diaphragme.

Le degré de précision nécessaire pour les découpes à la meule est une autre problème de ce système. Ce mode de découpe laisse une surface légèrement pelucheuse, obligeant un léger élargissement de l'entrefer. Puisque le moulage ne peut convenir (pour la raison citée plus haut), il est possible de remplacer la découpe à la meule par une découpe à l'aide de machines spéciales, comme celles servant à la découpe sinueuse et précise de tissus empilés, une découpe extrêmement propre. Mais là aussi, pour une fabrication en série, le prix de revient le coût, l'amortissement de machines spéciales, le temps de fabrication sont autant d'éléments qui deviennent des obstacles pour un produit devant être commercialisé. Une idée, peut être géniale, mais appliquée avec des moyens trop rudimentaires, ou d'une manière artisanale, donnera un produit cher et ne révèlera qu'une partie de ses possibilités.

En tant qu'invention française, à la fois parfait et imparfait ce haut-parleur mériterait un avenir plus heureux. Subjectivement et même imparfait, il possède déjà de très nombreuses qualités. Des améliorations lui permettraient de donner le maximum de ses possibilités.

La figure 92 place, d'un point de vue technologique, le haut-parleur Orthophase par rapport aux autres haut-parleurs plans.

La figure 93 montre un tableau où les haut-parleurs plans sont répartis en plusieurs catégories, selon le mode de vibration de la membrane et la répartition des forces motrices. Il montre le gros intérêt technologique du haut-parleur Orthophase par rapport aux autres systèmes à diaphragme plan.

## Le haut-parleur ESS

Ce haut-parleur d'origine américaine (inventé par le professeur Oscar Heil) est, lui aussi, un haut-parleur plan. Un peu comme le haut-parleur japonais « Dynapleats » il est basé sur une membrane plissée où est imprimée un ruban conducteur en zig zag.

Mais cette membrane va travailler selon un mode très particulier. L'air pris entre les plis sera aspiré ou expulsé. Le sens où passe le courant dans le conducteur imprimé explique ce fonctionnement. De chaque côté de chacun des plis, le signal passe dans un sens opposé. Il va se former, suivant un signal positif où négatif, un resserrement où un écartement entre ces conducteurs. Etant fixés sur les plis d'une membrane, ils feront se resserrer ou s'écarter ces plis. Ce principe a été appelé

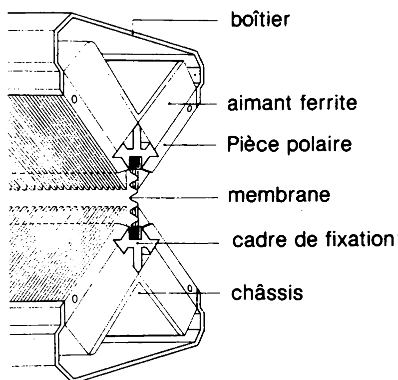



*Fig. 94 : Transducteur Heil. Disposition des divers éléments.*

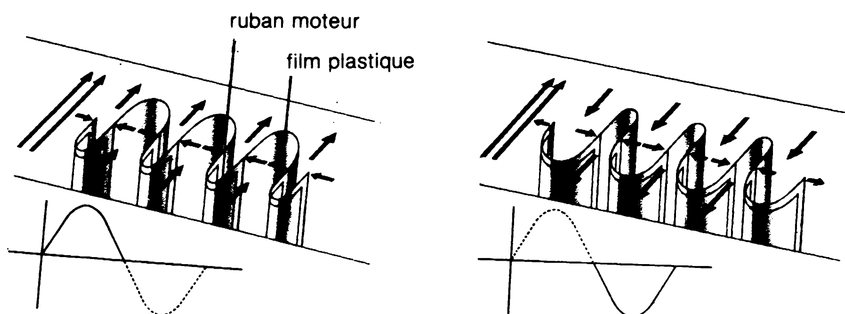



*Fig. 95 : Explication du fonctionnement. La façon dont sont attirés ou repoussés les rubans provoque un effet de succion ou d'expulsion de l'air placé entre les plis.*

« transformateur acoustique » par son inventeur, ceci à cause de l'effet de « pincement de l'air » entre les plis.

Placés à 90 ° par rapport à la position du ruban traditionnel de Gerlach, ce système de transducteur demande une conception assez particulière du circuit magnétique (figure 94).

La figure 95 schématise la manière dont travaille les rubans moteurs actionnant les membranes plissées.

Ces performances sont très bonnes et limitées à la reproduction des fréquences aigües.

La figure 96 montre la courbe de réponse axiale, et, dans le sens horizontal, les courbes de réponse à 30 ° et à 60 °. Ces courbes sont d'ailleurs excellentes.

La figure 97 montre la caractéristique d'impédance qui, comme pour les systèmes à ruban (rubans imprimés ou fils collés sur des membranes planes) est très linéaire.

Ce haut-parleur, tout en étant de type à diaphragme plan, est donc différent par son principe. Ce système intéressant possède une particularité : la partie active ne comporte pas, que ce soit sur sa face avant où sur sa face arrière « d'ombre acoustique », généralement formée sur les transducteurs plans par les rangées d'aimants et de pièces polaires. Sur ce transducteur les pièces polaires sont placées sur le côté et la plus grande partie du diaphragme est visible sur ses deux faces. Il échappe également aux défauts des fuites acoustiques sur les côtés non munis de suspension, car ce système est hermétique sur sa périphérie.

Bien que la façon dont se meut la membrane sous un signal sinusoïdal soit très particulière, l'onde acoustique est semblable à celle que procure un transducteur à

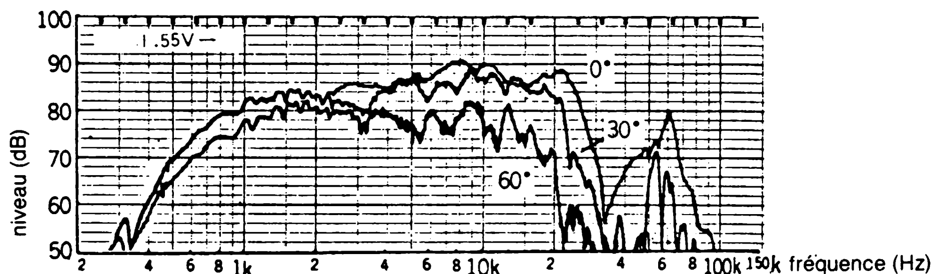



*Fig. 96 : Courbe de réponse du transducteur Heil.*

ruban. Ce transducteur à « transformation acoustique » se caractérise par une directivité en « doublet » (forme de « 8 »). Sa construction lui donne, sauf amortissement d'un côté de la membrane, une courbe de réponse similaire d'un côté comme de l'autre.

D'autre part, le travail de la membrane et des plis laisse présager une chute de niveau aux fréquences élevées, dans le sens vertical, dès que l'on quitte le plan du transducteur.

La caractéristique de directivité horizontale est malgré tout excellente, supérieure à ce qui est rencontré d'ordinaire sur les transducteurs plans. Concu vers 1973, ce haut-parleur continue d'être construit. Son succès commercial reste stable, ce qui n'est pas en général le cas des transducteurs spéciaux. Malgré des avantages certains, où même exceptionnels, les constructeurs préfèrent souvent recourir à la solution plus banale et ancienne du haut-parleur Rice-Kellogg.

Contrairement à la majorité des haut-parleurs dynamiques, ce système n'est pas reversible. Ceci est dû au principe même. L'effet de « pincement de l'air », provoqué

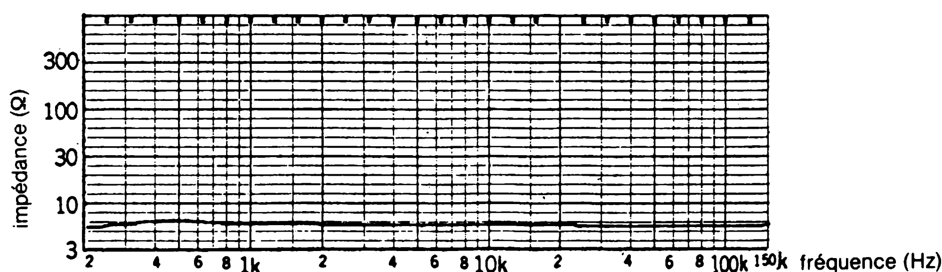
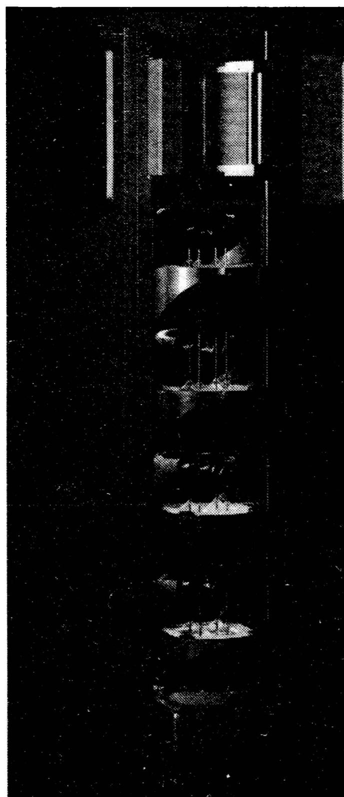



*Fig. 97 : Caractéristique d'impédance du haut-parleur Heil.*

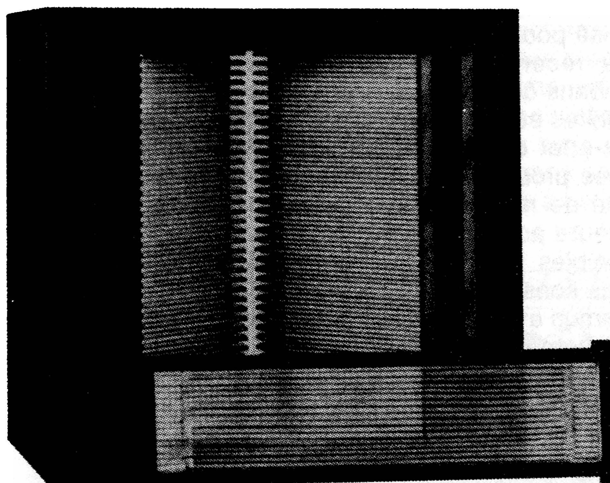
par les rubans, ne se produit pas si ce transducteur est utilisé comme microphone. Même s'il se produit un déplacement de la membrane, étant donné que l'écartement restera identique entre les plis ceci n'entraînera pas de variation d'induction dans le ruban conducteur.

Ce haut-parleur peut être utilisé pour les bandes médium et aiguë. Pour les fréquences graves, le Dr Heil a récemment proposé un système similaire. La membrane plissée, munie de rubans conducteurs, est remplacée par des disques rigides mus par des bobines mobiles et des circuits magnétiques, placés de part et d'autre, et procurant ce même effet de succion et d'expulsion de l'air. Il existe cependant, à ce niveau quelques problèmes mécaniques (transmission entre les disques) et surtout un problème de masse en mouvement, qui demande à être réduite, malgré le volume. A l'heure actuelle, ce système est déjà commercialisé. Les nouveaux matériaux disponibles pourront peut-être permettre d'en faire un transducteur intéressant pour les sons graves.

Ce haut-parleur ESS a en commun ave les autres transducteurs plans, la possibilité d'une adaptation à l'asservissement. Un deuxième circuit électrique, permettrait un contrôle plus général donc beaucoup plus efficace que sur un système traditionnel (asservissement sur haut-parleur à cône).



*Haut-parleur américain ESS, utilisant pour les fréquences aigues le tweeter ESS à « transformateur acoustique » et pour la reproduction de la bande grave/médium un transducteur très particulier, basé lui aussi sur le même principe.*



*Tweeter ESS du docteur Heil, vue de face. La membrane plissée est montée sur un cadre amovible.*

### Le haut-parleur de Rice Kellogg

Ce haut-parleur électrodynamique s'imposa très rapidement sur le marché. Ses inventeurs sont Chester W. Rice et Edward W. Kellogg de la firme américaine Général Electric.

A ces débuts, ce haut-parleur fut commercialisé avec son amplificateur spécial, capable de débiter près 1 W. sans distorsion notable. Ce qui paraît aujourd'hui ridicule, était pourtant remarquable pour l'époque. Il fut vendu à ses débuts pour le prix élevé de 250 $. Etudié entre 1920 et 1924 il fut mis sur le marché en 1925. Une construction en grande série en fit ensuite rapidement baisser le prix. La fabrication sous licence de modèles Rice Kellogg, comme ceux de la British Thomson Houston Company par exemple, alla dans le même sens.

Avant d'entrer dans les détails, il est intéressant de rechercher l'origine de ce transducteur, devenu le plus universel des haut-parleurs.

Son origine, puisqu'il s'agit d'un haut-parleur électrodynamique, remonte donc à

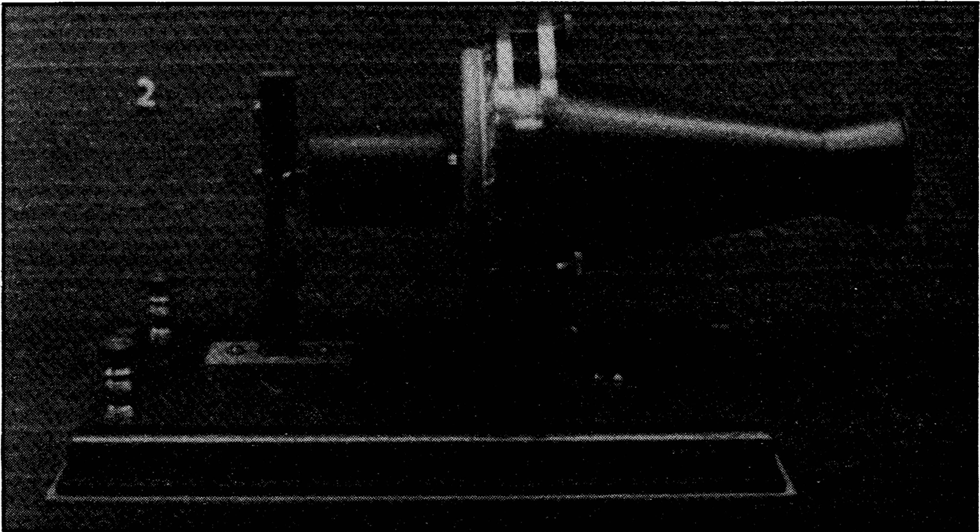



*Fig. 98 : Téléphone de Bell.* *(Musée des techniques, Londres).*

l'invention de Graham Bell (figure 98). Bien que son utilisation ne soit pas exclusivement réservée au haut-parleur, il faut également noter les dépôts de brevets de Ernst Wermer (de la firme Siemens & Halske) en 1877 ainsi que de Sir Oliver Lodge en 1898. La figure 99 montre la photo de Sir Oliver Lodge, qui fut aussi un pionnier de la radio et de l'électro-acoustique.

Sur la figure 100, on voit la photo de l'élément transducteur à bobine mobile.

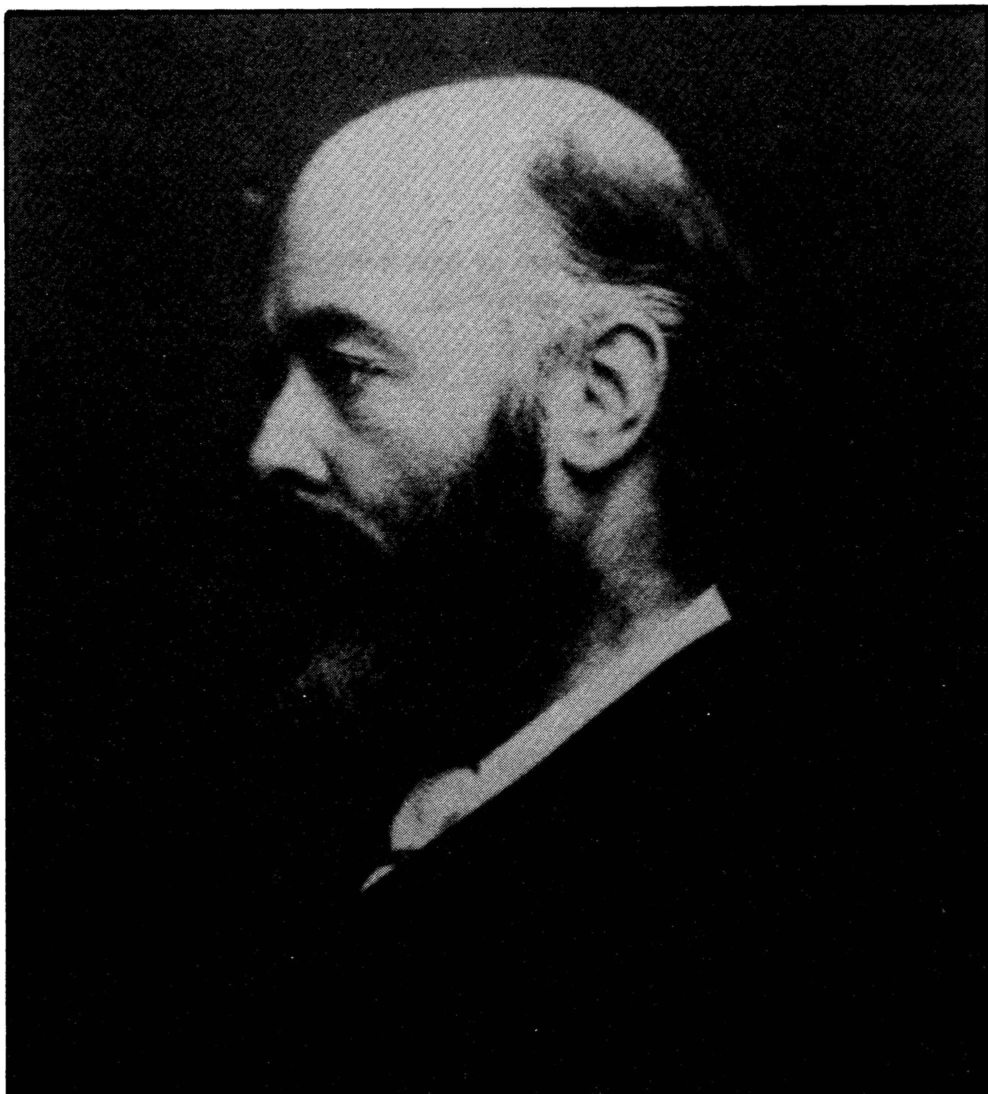


*Fig. 99 : Sir Oliver Lodge (1851-1940).*

C'était, en quelque sorte, l'invention du « moteur du haut-parleur ». Sa conception était très en avance sur l'époque, puisqu'il n'existait pas encore d'amplificateur assez puissant et d'impédance assez basse pour l'attaquer. Ce moteur est encore conservé au musée des Techniques de Londres, ainsi que d'autres appareils réalisés aussi par Sir Oliver Lodge.

Ces deux inventions devaient donner naissance à un haut-parleur semblable à celui de Rice-Kellogg. Plusieurs conceptions du diaphragme coexistaient et avaient été appliquées au phonographe. Le diaphragme à rayonnement direct des frères Lumière (sortes d'éventails de forme circulaire, mûs en leur centre par un levier fixé à la pointe motrice) était l'un deux.

En France, certaines inventions sont antérieures à celles de Rice-Kellogg. La

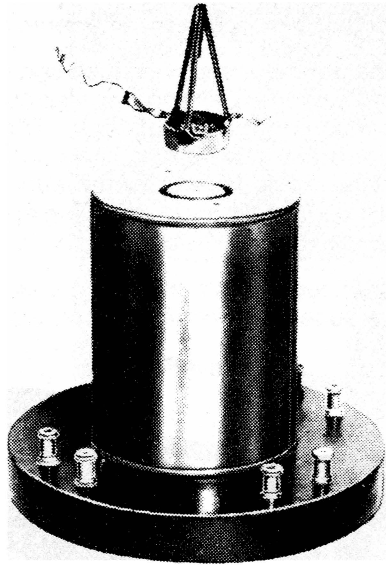


*Fig. 100 : Transducteur à bobine mobile de basse impédance, inventé par Oliver Lodge en 1898. (Musée des techniques, Londres)*

Revue du Son (Mai 1959) parle d'un certain haut-parleur Dufour- Huguenard, réalisé en 1915. Il s'agissait en fait d'un casque mais son principe était parfaitement extrapolable en un petit haut-parleur (figure 101).

Une autre invention serait due à Paul G.A. Voigt de la firme Edison Bell. Voigt était

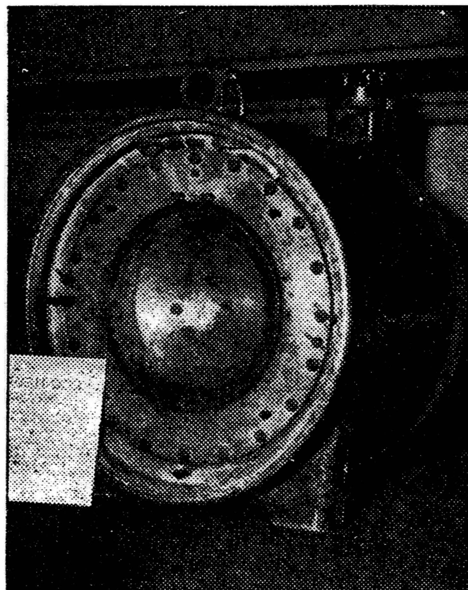


*Fig. 101 : Ecouteur électrodynamique à bobine mobile, utilisable en petit haut-parleur, inventé par Dufour-Huguenard en 1915 (Revue du Son, Mai 1959)*

connu pour ses nombreux travaux, entre autre sur des circuits magnétiques énormes ou des pavillons « Tractix Horn » pour haut-parleurs.

Soucieux de réaliser un haut-parleur sensible, d'un bon rendement, il conçut vers 1924 son système électrodynamique. Cet appareil, qui utilisait 4 bobines excitatrices dans un circuit magnétique énorme, pesait 35 kg. D'autres modèles du même genre avaient, peut-être, été créés auparavant, mais sans doute par des artisans qui avaient négligé de divulger ou de faire breveter leurs idées. On doit en conséquence reconnaitre en tant « qu'invention » ce qui a été appliqué en pratique le plus rapidement : le haut-parleur de Rice et Kellogg.

Le haut-parleur de Rice Kellogg utilisait un moteur d'excitation volumineux à ses débuts, qui fut réduit par la suite. La première description en Europe fut faite par

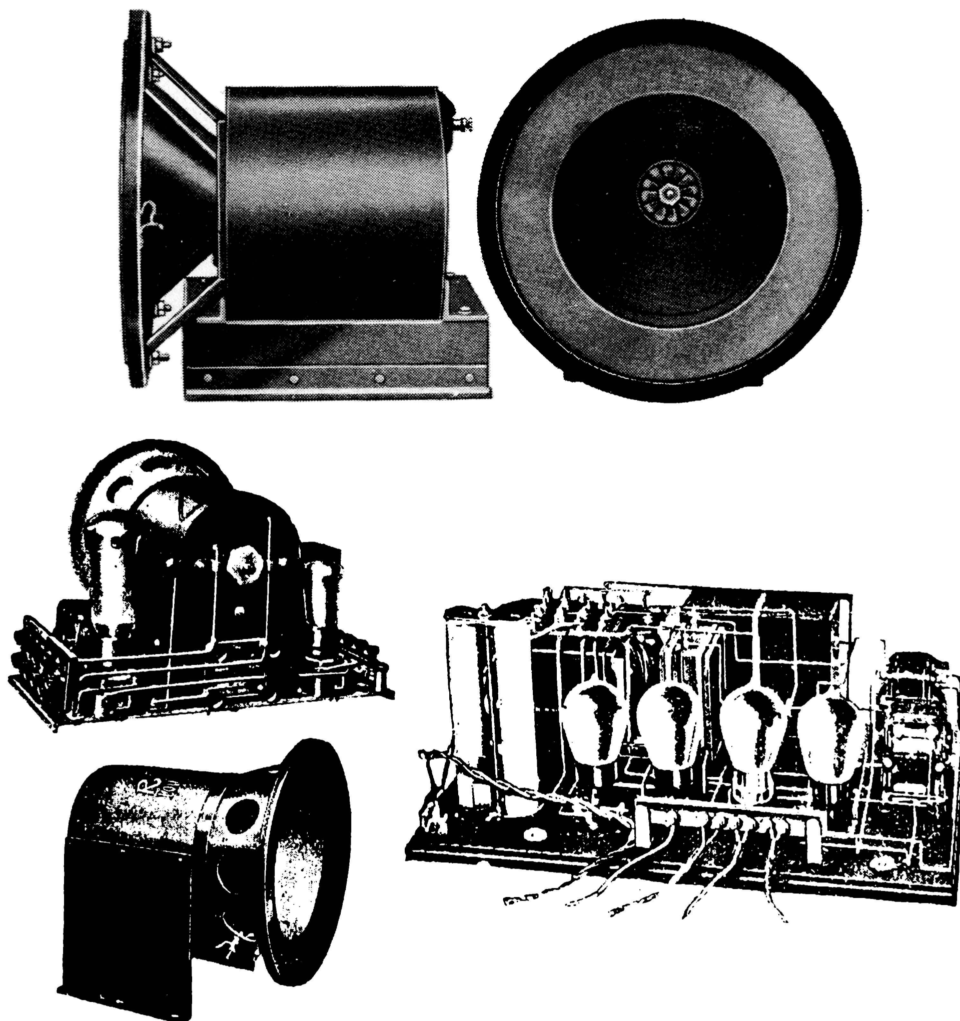


*Fig. 102 : Haut-parleur de Rice-Kellogg, commercialisé en 1925. Prototype et version commerciale « Radiola 104 » fabriquée sous licence par la Thomson-Houston en 1925. Le haut-parleur seul se vendait aux U.S.A. 250 Dollars. Quant à l'ensemble avec alimentation incorporée fabriqué sou licence, il se vendait à Londres au prix de £ 13 Sterling.*

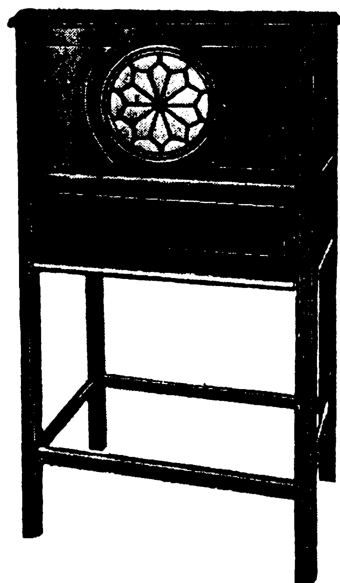


*Fig. 103 : Reproducteur Rice-Kellogg, fabriqué sous licence par la Thomson-Houston Company en 1925, de référence « R.K. Senior ». Il était monté dans une enceinte contenant l'amplificateur et le circuit d'alimentation pour le moteur à excitation. Son prix était de £ 45 Sterling.*

Mac Lachlan, dans le numéro de novembre 1925 de la revue anglaise Wireless World.

La Société Thomson Houston se porta rapidement acquéreur d'une licence de fabrication. La figure 102 montre des publicités des années 1925.

Plusieurs modèles étaient disponibles. Certains étaient vendus nus, utilisables avec un courant d'excitation continu de 6 V ou 100 V. D'autres possédaient un amplificateur incorporé. A ses débuts, ce haut-parleur était plutôt moins sensible que ses concurrents utilisant d'autres systèmes, aussi Rice et Kellogg cherchèrent-ils à obtenir le meilleur rendement possible. Un diamètre de 16 cm semblait le meilleur compromis pour la membrane, vis-à-vis de la bande passante et de l'équilibre sonore (ce qui est effectivement vrai). Le circuit magnétique était assez imposant. L'appareil était en général proposé avec son amplificateur (figure 103). Celui-ci utilisait un seul étage utilisant deux tubes B II montés en parallèle. Cet ensemble encombrant et plus cher qu'un haut-parleur seul fut remplacé ensuite par un modèle utilisant un haut-parleur à aimant permanent.

En 1924, les premiers de ce type avaient un circuit magnétique de section carrée sur lequel étaient disposés huit aimants en barre.

Tous ces modèles comportaient deux suspensions. Celle de la périphérie était faite soit de tissu imprégné, soit de peau de chamois. Elle portait déjà la dénomination de « Free Edge ». La seconde était une suspension placée au centre (visible sur les photos), différente du spider actuel (disque en tissu gaufré placé au sommet et autour de la bobine mobile). Cette suspension prenait des formes diverses, et était le plus souvent en bakélite ou en papier. Ce disque découpé, fixé en son centre sur la pièce polaire (noyau) guidait la bobine mobile et le cône transducteur. Une large amplitude de déplacement était ainsi obtenue. Ce point est très important car, jusqu'ici, la possibilité de grande excursion de la membrane était un point qui était resté jusqu'ici plus ou moins négligé. Le haut-parleur de Rice Kellogg était, enfin, le

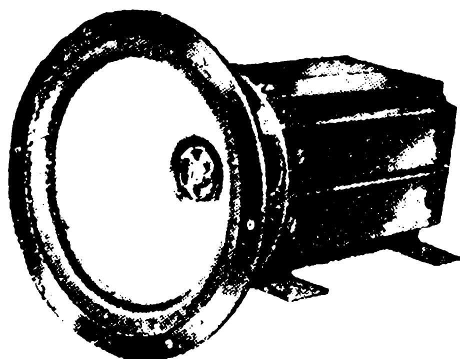


*Fig. 104 : Haut-parleur Rice-Kellogg, à aimant permanent, proposé par la Thomson-Houston en 1926. Il utilisait huit aimants plats et relativement longs, montés sur un circuit magnétique de section carrée. Remplaçant le système à électro-aimant, son prix était malgré tout élevé, mais il baissa peu à peu au long des années.*

premier capable de procurer une grande élongation de la membrane.

Ceci devait permettre d'abaisser sans difficulté la fréquence de résonance principale.

La figure 105 montre la vue en coupe de trois versions du haut-parleur Rice Kellogg.

La courbe de réponse de ces transducteurs était honnête, malgré une fréquence de résonance assez élevée (premières versions). La figure 106 donne un exemple de courbe de réponse d'un haut-parleur datant des années 30.

Si B est le flux dans l'entrefer (densité de flux magnétique) *l* la longueur du fil de la bobine, *i* l'intensité du courant traversant cette bobine et si le flux est constant pendant le déplacement de la bobine, on peut considérer que la force de déplacement a une valeur proche de B x *l* x *i* (les pertes calorifiques et mécaniques n'étant pas prises en considération).

Ce transducteur est directement lié aux performances du système magnétique

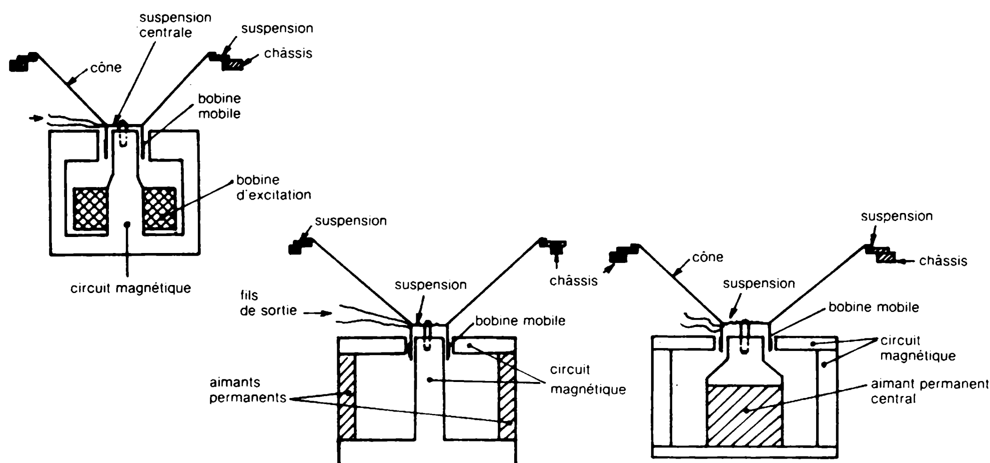



*Fig. 105 : Haut-parleur de Rice-Kellogg. Vue en coupe de trois versions, dont celle à aimant permanent. La version à aimant permanent est devenue universelle.*

(choix du système magnétique utilisé et propriété de l'aimant), ainsi qu'à la conception de l'équipage mobile complet (membrane, bobine mobile, suspensions). Contrairement aux autres haut-parleurs décrits jusqu'ici, par exemple le Blatthaller et ses dérivés, la surface motrice est très réduite par rapport à la surface active. On doit considérer pour ce système la notion fondamentale du contrôle de l'inertie d'une masse en mouvement. Cette notion était négligeable sur des transducteurs comme le ruban ou le haut-parleur électrostatique, compte tenu des faibles masses en mouvement à considérer. Il en va différemment pour le Rice Kellogg, avec des valeurs de masse mobile non négligeables. A cela s'ajoutera le problème d'une surface active mue en un seul point qui va être la source de distorsion parasite plus où moins importante, ainsi que de plusieurs résonances, dont une dite « principale ». La suspension peut jouer un rôle important pour contrecarrer cette dernière.

Afin d'éviter un court circuit acoustique entre d'avant et l'arrière de la membrane, il est nécessaire de monter ce système sur un baffle ou une enceinte. Mais ceci est nécessaire pour la plupart des haut-parleurs.

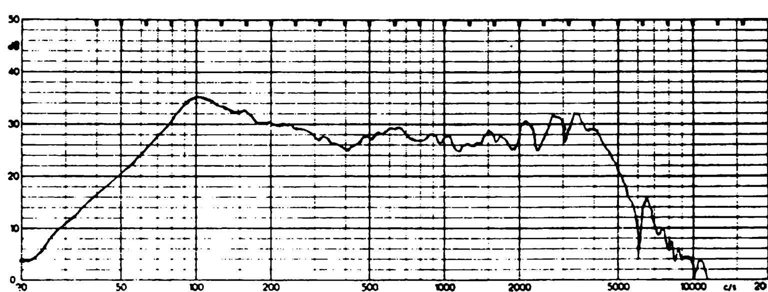



*Fig. 106 : Courbe de réponse d'un haut-parleur datant des années 30 (modèle Ormond).*

Ce transducteur a un rendement assez bas, de l'ordre de 1 à 5 %. Compte tenu de la grande variété existant actuellement, la puissance admissible est très variable. On peut la situer entre 1 W et plusieurs centaines de Watts.

## Circuits magnétiques

Il existe de très nombreuses variantes pour les circuits magnétiques utilisés dans les haut-parleurs de type Rice Kellogg. On peut, cependant, les répartir en deux catégories : l'une utilisant un aimant central, l'autre utilisant un aimant en couronne, placé à l'extérieur du circuit magnétique. La théorie magnétique utilisée pour la plupart de ces transducteurs peut être assimilée à un équivalent de la loi d'ohm ou les termes principaux seront la force magnétomotrice M, la réluctance R et le flux magnétique Φ. Dans la pratique, des difficultés apparaissent pour calculer ces systèmes, à cause des phénomènes quasi-inévitables de fuites magnétiques et de distribution non uniforme du flux à l'intérieur du circuit.

La mesure des éventuelles fuites magnétiques (ainsi que la recherche de la forme de circuit magnétique qui les minimisera) pourra être efffectuée à l'aide de sondes magnétiques. Celles-ci sont soit des bobinages, soit des cellules à effet « Hall ».

L'électro-aimant n'est pas forcément un moyen dépassé de produire l'énergie magnétique. Les progrès incessants observés depuis 1920 ont cependant porté en majorité sur l'aimant permanent. C'est, pour un haut-parleur la pièce maîtresse, le « moteur ». Les aimants possèdent des caractéristiques magnétiques données. Les plus importantes sont la rémanence, le produit BH, la coercivité.

La rémanence est la persistance de l'aimantation une fois que cet aimant a été chargé. Cette charge se fait à l'aide d'un électro-aimant très puissant où va passer, pendant un temps très court (environ 1 seconde) un courant très important (environ 10 000 A), fourni par un condensateur de très forte valeur.

La technologie de ces aimants a fait de rapides progrès (en particulier la technique de l'orientation). On peut ainsi trouver sur le marché une nouvelle génération d'aimants. Parmi ceux-ci, citons l'Almax (marque déposée), fabriqué par Matsushita

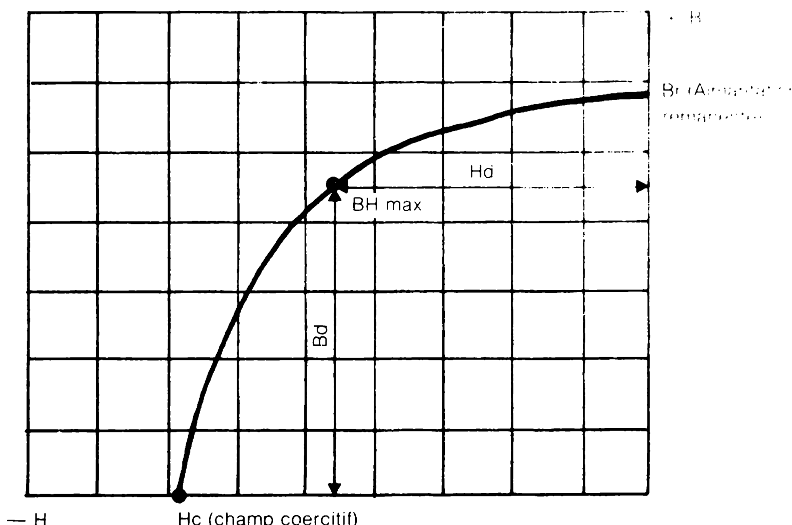



*Fig. 107 : Courbe de désaimantation typique d'un aimant permanent.*

Electric au Japon, aimant dont la caractéristique de BH se situe entre celle des aimants ferrites conventionnels et celle des aimants au cobalt. Utilisant des matières premières abondantes (aluminium, carbone, manganèse) son prix sera plus abordable (par rapport aux aimants au cobalt). Il possède en outre la qualité de ne pas être cassant (contrairement aux aimants céramique ou ferrite) et peut donc être travaillé ou tourné sans problème majeur (dureté et caractéristiques mécaniques proches du fer).

## Circuits magnétiques et pièces polaires

Laissant de côté le classement fait antérieurement (aimant central ou aimant en couronne), nous allons passer en détail aux divers idées appliquées jusqu'à ce jour. On peut affirmer que, depuis 1925 (date de sa naissance) toutes les formes de pièces polaires ont été appliquées, voire commercialisées, pour les haut-parleurs.

### aimant central

Dans un circuit magnétique pour haut-parleur électrodynamique, les deux points les plus importants, qui conditionneront le rendement et la sensibilité, sont la densité du champ magnétique dans l'entrefer et le flux magnétique total.

Pour les haut-parleurs à aimants permanents, le volume des aimants, l'emplacement de ceux-ci dans le circuit magnétique, et la forme des pièces polaires sont les principaux facteurs qui interviendront sur le résultat recherché. Suivant la technologie employée, les fuites magnétiques seront plus ou moins importantes. Ces fuites proviennent soit de l'aimant lui-même (aimant à structure non orientée par exemple), soit du collage de l'aimant dans le circuit, soit encore de la forme des piè-

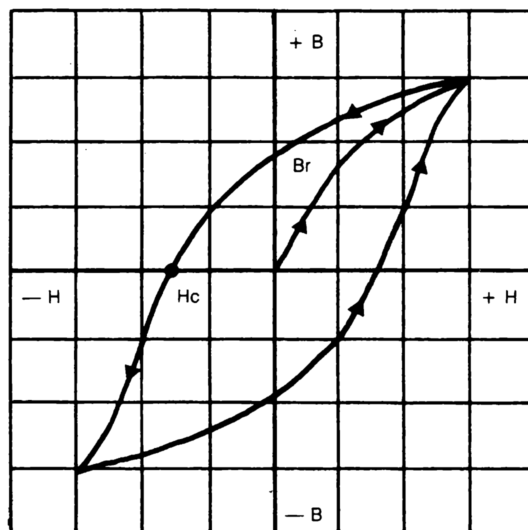



*Fig. 108 : Allure caractéristique de la courbe BH d'un aimant permanent (courbe d'hystérésis)*

ces polaires où de leur assemblage. Le collage, par exemple, nécessaire dans presque tous les cas, provoque obligatoirement un entrefer qui, aussi faible soit-il, sera la cause d'une possible fuite magnétique. L'assemblage des pièces polaires, parfois réalisé sous des angles de 90 °, peut aussi entrainer une fuite magnétique. La forme, l'épaisseur, la configuration de ces pièces polaires influencera l'intensité de cette fuite.

La solution de l'aimant central, compte tenu de sa position favorable dans le circuit, reste celle qui minimisera ces fuites.

Sur de nombreux haut-parleurs relativement anciens, la qualité des aimants au cobalt de l'époque, (caractéristiques moyennes sinon mauvaises) exigeaient, pour bien fonctionner, une configuration où les fuites n'avaient pas leur place.

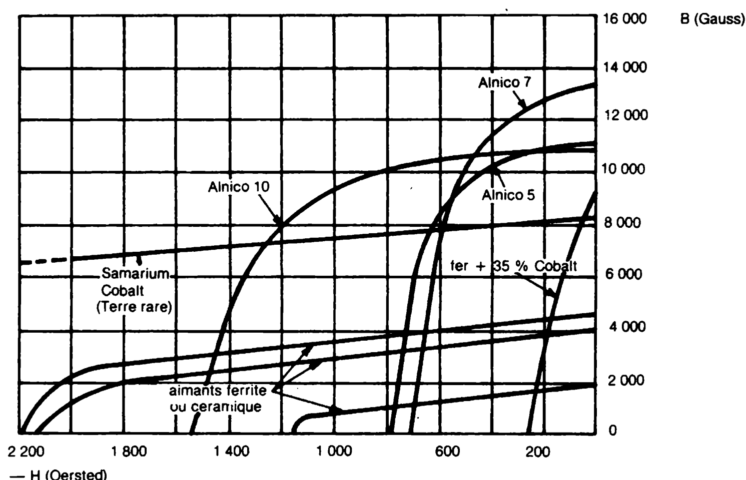



*Fig. 109 : Allure du BH de quelques aimants utilisés sur les haut-parleurs.*

| Matériau | Br | Hc | B | H | BH |
|---|---|---|---|---|---|
| Ticonal GX | 13 500 | 700 | 12 000 | 620 | 7,5 |
| Alcomax III | 12 200 | 650 | 9 500 | 500 | 4,7 |
| Ticonal G | 13 450 | 580 | 11 000 | 520 | 5,7 |
| Magnadur 2 | 3 900 | 1 900 | 2 000 | 1 760 | 3,4 |
| Magnadur 3 | 3 400 | 3 000 | 1 800 | 1 600 | 2,9 |
| 35 % Cobalt | 9 500 | 250 | 6 000 | 160 | 0,96 |

*Fig. 110 : Propriétés magnétiques de quelques aimants (le nom de certains d'entre-eux sont des marques déposées).*

La figure 111 montre la coupe schématique d'un moteur à aimant central. Cet aimant, très généreux, en Alnico ou similaire (aimant au cobalt, Alcomax, Ticonal, etc.) est le plus souvent cylindrique. Un polissage (limité à deux faces pour un problème de prix de revient) est destiné à limiter au minimum l'entrefer avec les pièces polaires en contact.

Ces aimants peuvent être soit collés, soit fixés par une couronne. Ils peuvent également être « tenus », grâce à des rainures ou des cavités creusées dans les plaques de champ, le tout étant maintenu par des vis de serrage. Quelquefois, l'aimant est percé en son centre, où passe une vis de serrage. Pour toutes ces dispositions, il faut considérer le rapport flux utilisable (dans l'entrefer) et le flux inutilisable (fuites aux alentours de l'entrefer - au dessus et au dessous - et autres fuites, extérieures ou intérieures).

Selon Gayford, on peut considérer que la force magnéto-motrice disponible au niveau de l'entrefer est égale au produit LH (L étant la longueur de l'aimant et H la valeur de la force cœrcitive) si l'aimant travaille à son point de BH maximum. Il n'est pas tenu compte des pertes apportées par le circuit magnétique même ou par les plaques de champ. La densité de flux sera égale à LH/G. Pour une section d'entrefer $\pi$ DT (où D est le diamètre de l'aimant) on peut exprimer la valeur du flux de fuite par : LHC$\pi$ D (C est un facteur dépendant de la structure de l'aimant, d'une valeur moyenne de 3,5). Le flux total utilisable aura une valeur de LH$\pi$ DT/G.

Conformément à la loi de Laplace (ou loi de Fleming), la bobine mobile baignant dans un champ magnétique va être la source d'un déplacement (la règle des trois doigts de Laplace donne les trois directions de champ, courant et sens de déplacement). Le sens de déplacement est donc lié à une attraction ou une répulsion magnétique. Cette répulsion (ou attraction) s'exerce en présence de lignes de forces parallèles ou bout à bout (aimants en barre aimantés dans le sens de la longueur et placés côte à côte ou encore bout à bout). Selon la loi de Laplace, il va se produire, autour de chaque fil composant la bobine mobile une multitude de champs tournants. En coupe, on a donc dans l'entrefer un champ rectiligne dans lequel plonge un champ tournant.

La force de déplacement (lorsque la bobine plonge ou sort de l'entrefer) est donc produite par les parties supérieures et inférieures de ces champs tournants. Ces parties, à cause du champ tournant, sont toujours en sens opposé : le champ radial provoquera une répulsion pour la partie supérieure du champ tournant et une attraction pour la partie inférieure de ce champ tournant (ou vice-versa), ceci par rapport au champ radial de l'entrefer. C'est, en quelque sorte, un travail en push-pull, qui va à la fois « tirer et pousser vers le haut » ou « tirer et pousser vers le bas », suivant le sens du courant passant dans la bobine mobile. Tenant compte que deux points du champ seront utilisés pour procurer ce mouvement vertical, on aura donc affaire à un champ tournant et non à un champ rectiligne (solution idéale). Ceci pourrait expliquer pourquoi le mouvement de la bobine mobile n'est par parfaite-

ment vertical : en l'absence de système de centrage, il est très facile de mettre en évidence ce phénomène d'instabilité du sens de déplacement. Sur ce point, le fil plat possède un léger avantage, de même que le haut-parleur à ruban , pour lequel on a cette fois affaire non pas à un champ tournant se formant autour du conducteur mobile, mais à un champ pratiquement rectiligne (le ruban est à la fois très large et très mince). Ceci doit certainement jouer sur le rendement, car on peut utiliser soit deux points d'un champ tournant soit des surfaces plus larges et pratiquement parallèles.

Pour en revenir à la bobine mobile, la force créée par le champ magnétique lors du passage du courant dan la bobine transductrice est conforme à la loi de Laplace. Sa valeur sera donnée par $F = Bil$ (F est la force en Newton, B le champ magnéti-

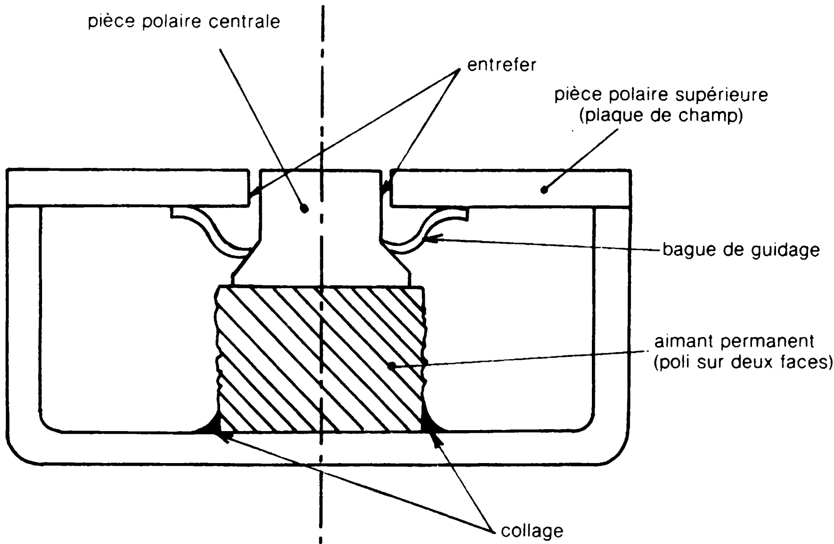



*Fig. 111 : Coupe schématique d'un circuit magnétique conventionnel à aimant central.*

que en Tesla - 1 Tesla = 10 000 Gauss, $i$ l'intensité du courant en ampères et $l$ le déplacement en mètres.

Un haut-parleur électro-dynamique est reversible. Le déplacement de la bobine mobile dans un champ magnétique va apporter, selon la loi de Lenz, un effet de force contre électro-motrice donné par : $e = Blv$, où $v$ est la vitesse instantanée de la bobine mobile en m/s et où $e$ est la tension en volts. Lorsque le haut-parleur travaille, il faut considérer cette tension, ainsi que celle du signal, indépendante du mouvement de la bobine mobile. Il n'est pas très facile d'analyser séparément cette tension $e$ issue de la force contre-électromotrice, ceci pendant le mouvement, car les tensions ne sont pas en phase. Par contre, il est facile de mesurer le signal que renvoie le haut-parleur vers l'amplificateur de puissance, après une impulsion. Pour cela, un montage en pont (figure 111 bis) permettra de recueillir sur un voltmètre ou un oscilloscope cette tension $e$. Sur certains haut-parleurs de haut rendement, cette tension peut atteindre plusieurs volts.

Sur les haut-parleurs courants, la densité de flux ne dépassant que rarement 14 000 Gauss (1,4 Tesla), on utilise souvent du fer doux pour les pièces polaires, ceci pour des raisons strictement économiques. On pourrait, bien sûr, utiliser des matériaux de caractéristique de BH supérieure, comme certains fers recuits ou des alliages spéciaux, ou encore recourir à des techniques plus complexes comme les

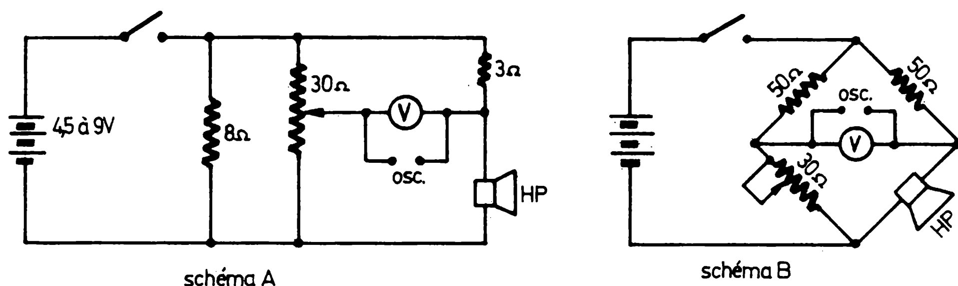



*Fig. 111 bis : Montages permettant d'analyser le signal (trainage) émis par le haut-parleur après un impulsion brève. Ils servent pour l'analyse de l'amortissement. Les résistances variables servent à stabiliser la trace sur l'oscilloscope.*

plaques de champ feuilletées, faites d'un empilement de matériaux magnétiques très perméables en feuilles minces.

Cette technique est utilisée sur certains haut-parleurs de haute fidélité, du genre Sony « ULM », où ULM veut dire « Utra Linear Magnétic Path ».

La figure 112 montre les courbes BH du fer doux et d'autres matériaux utilisés pour les pièces polaires.

La figure 113 montre les diverses formes de plaques de champ et de pièces polaires pour une structure à aimant central. Pour ces moteurs les aimants ne sont chargés qu'après le montage du circuit magnétique complet, ce qui permet un montage plus aisé. Cette charge s'effectue grâce à un électro-aimant très puissant alimenté par un condensateur de très forte capacité (10 000 à 50 000 A se déchargeant pendant un temps variable, allant de 20 ms à 1 seconde), ou à l'aide d'un ignitron. Dans presque tous les cas les moteurs sont donc saturés au maximum du BH de leurs aimants. A noter qu'un démontage et remontage (difficile à effectuer en raison des forces d'attraction et du centrage rigoureux de l'entrefer) fait perdre à l'aimant une bonne partie de sa force. Ceci est beaucoup moins le cas avec les aimants ferrite

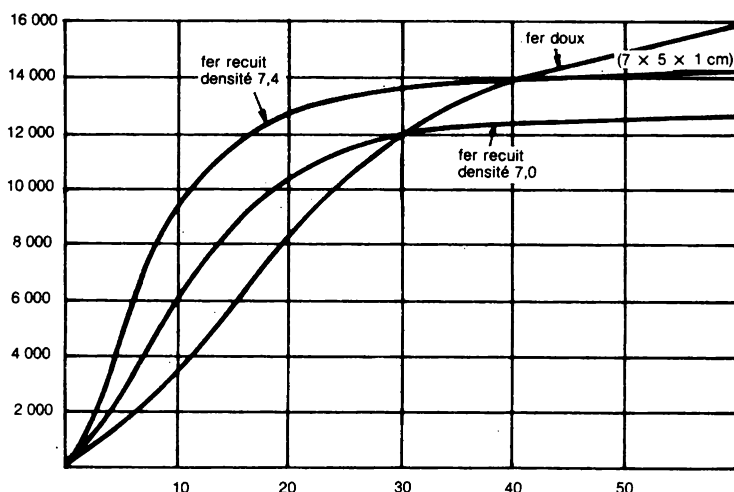
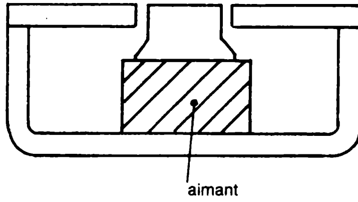
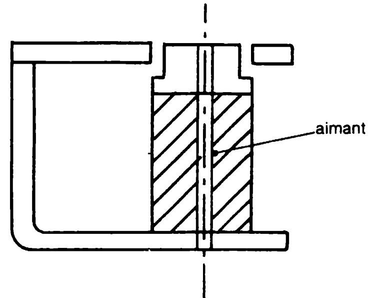
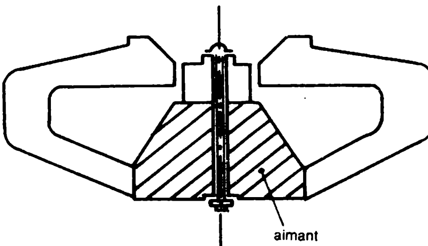


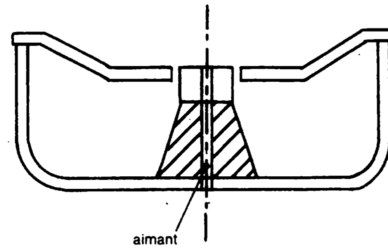

*Fig. 112 : Caractéristiques de matériaux magnétiques utilisés pour les moteurs de haut-parleurs ( plaques de champ, noyaux, etc..)*

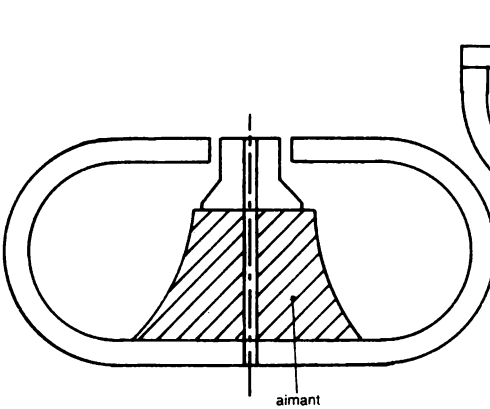
VUE EN COUPE



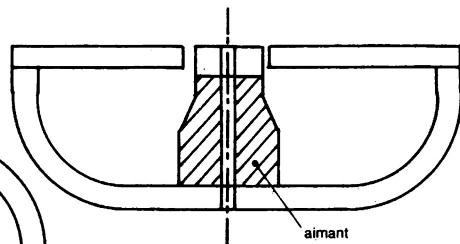




*Fig. 113 : Vue en coupe de divers moteurs de haut-parleurs utilisant un aimant central.*

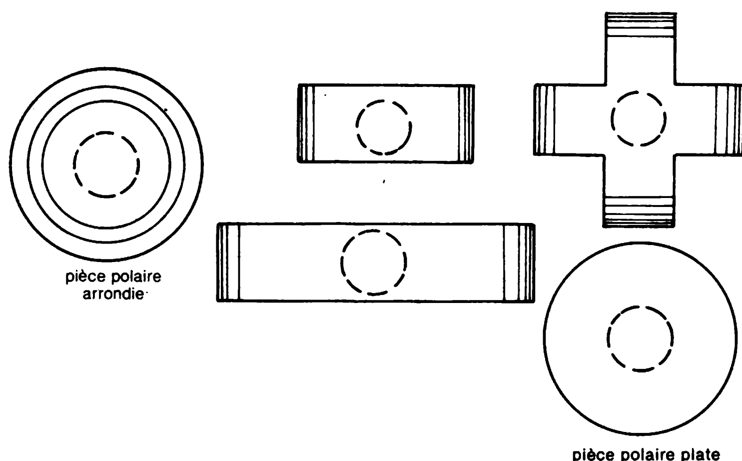



*Fig. 113 : Vue dorsale de divers moteurs de haut-parleurs utilisant un aimant central.*

ou céramique. Quelques rares moteurs sont pratiquement indémontables car ils sont soudés à l'arc où grâce à une surface étamée qui permet une soudure directe sur les pièces polaires.

Comme on le voit sur la figure 113, il existe de nombreuses variantes. La majorité d'entre elles ont été abandonnées, non sur un critère de qualité, bien au contraire, mais pour des problèmes de prix de revient ou de difficulté de fabrication. En effet, certains montages nécessitent que les pièces polaires soient soudées après insertion de l'aimant central (et l'on sait que la plupart des aimants perdent de leurs qualités lorsqu'ils sont chauffés).

Tous ces aimants (cobalt, ticonal etc.) sont en général très résistants à l'oxydation et donc rarement protégés par de la peinture ou du vernis.

Certaines technologies, comme celle du haut-parleur anglais Weber (figure 114) donnent une structure quasi-idéale où le circuit magnétique ne permet aucune fuite magnétique et demande, après le placement d'un aimant central, l'insertion d'un bobinage d'excitation. La partie externe du circuit magnétique est ensuite montée et soudée, en prenant soin de laisser les fils du bobinage d'excitation sortir de l'entrefer. Une fois le montage terminé a lieu, grâce à ce bobinage interne, l'opération de charge de l'aimant. Ce bobinage ne sert donc qu'une fois car il n'est plus possible de le retirer du circuit. Cette méthode qui vise un idéal de concentration maximum du flux dans l'entrefer sans risques de pertes est donc très coûteuse .

Pour les petits haut-parleurs, l'aimant central est souvent utilisé. On le rencontre notamment dans les petits récepteurs radio miniatures car il offre l'avantage de ne présenter que très peu de fuites magnétiques. De même, pour les haut-parleurs de téléviseurs pour lesquels une fuite éventuelle pourrait faire dévier ou déformer l'image, des techniques spéciales sont utilisées (aimants à blindage magnétique, capots de protection, haut-parleurs à aimant central inversé etc.).

Cette technologie de l'aimant central est très favorable au rendement du haut-parleur, compte tenu de son faible taux de fuite augmentant la valeur du flux utilisable. Sur les haut-parleurs pour haute- fidélité on ne l'utilise plus que rarement : on retrouve le problème du prix de revient trop élevé, dû aux alliages de cobalt (Tico-

nal, Alcomax, Alnico etc.) de plus en plus rares. Le prix du cobalt, pour certains pays n'a cessé en effet de monter entre 1950 et 1970, ce qui ne l'a pas empêché de tripler entre 1977 et 1980. Cette technologie est donc abandonnée petit à petit au profit des aimants céramique ou ferrite, qui se prêtent mieux au montage en couronne. Ces céramiques sont en général des poudres de ferrites de barium ($Ba\ Fe_{12}\ O_{19}$) agglomérés par une résine collante, le tout étant recuit. On peut créer des structures non orientées (isotropiques) ou orientées (anisotropiques).



*Fig. 114 : Haut-parleur Webber (Bristol, G.B.), réalisé en 1930. Remarquer la forme particulière du circuit magnétique ne présentant aucune fuite, grâce à sa forme arrondie. L'aimant central ne pouvait être chargé qu'après soudure des pièces polaires entre-elles. A cet effet, un bobinage était placé à l'intérieur du circuit magnétique. Les fils de ce bobinage sortaient par l'entrefer et ils permettaient ainsi de charger l'aimant permanent. Par la suite, il n'était plus possible de retirer le bobinage d'excitation (ne servant qu'une fois) qui restait ainsi prisonnier à l'intérieur du moteur. De telles formes de circuits ont été étudiées dans divers pays : Point Bleu (France), Nippon Ferranti (Japon) et bien d'autres. Cette forme de moteur est idéale mais la difficulté de fabrication et son prix de revient trop élevé ont fait abandonner cette technologie.*

## Aimant périphérique

C'est la solution la plus couramment utilisée aujourd'hui. Pour quelques haut-parleurs, on se sert encore d'aimant central (cobalt ou dérivés à base de cobalt). Vu le prix de revient très élevé, cette solution est réservée aux moteurs de diamètre moyen et aux haut-parleurs de haute qualité. Par contre, l'aimant céramique ou ferrite est aujourd'hui d'une utilisation généralisée. Malgré les progrès constants des aimants ferrite, ceux-ci n'offrent pas encore une caractéristique de BH aussi intéressante que celle des aimants au cobalt. Leur caractéristique intéressante de démagnétisation se prête bien à un montage sur la périphérie du circuit magnétique (aimants de forme annulaire) et aux montages en boucle ouverte pour lesquels le champ démagnétisant est élevé.

Ces ferrites, utilisées depuis 1926, date de l'invention et du dépot de brevet), présentent une valeur élevée de force magnéto-motrice. De l'ordre de 1000 Oersted, cette valeur est près du double de celle d'un bon aimant au cobalt.

Par contre, la densité de flux utilisable est beaucoup plus faible que pour les

aimants au cobalt (1000 Gauss au lieu de 10 000 Gauss) et demande une surface de section au moins 10 fois plus grande (ce qui n'est guère le cas dans les réalisations courantes).

Ces ferrites ou céramiques magnétiques étaient au départ la plupart non orientées (structure dite isotropique). De notables améliorations ont été possibles en agissant sur les technologies de l'orientation.

Pour obtenir ceci, on réduit en fine poudre cette ferrite de barium. En comprimant cette poudre, recuite sous un intense champ magnétique, il devient possible d'obtenir une orientation dans le sens désiré. Ces aimants sont, par exemple, vendus sous des labels commerciaux de « Magnadur II » ou « Feroba II » en Grande Bretagne.

La figure 115 montre plusieurs configurations des pièces polaires où est utilisé le principe de l'aimant en couronne. Bien que la forme ronde soit la plus appropriée, pour des questions d'esthétique, de modèles disponibles, de moules, on rencontre également des formes carrée ou rectangulaire.

Sur ces circuits magnétiques le champ de fuite est toujours notable, voire important. Plusieurs montages permettent de réduire ce défaut. Le plus courant et le moins onéreux, donc le plus utilisé, consiste à prendre des plaques de champ (supérieure et inférieure) de diamètre inférieur à celui de l'aimant en couronne. On peut

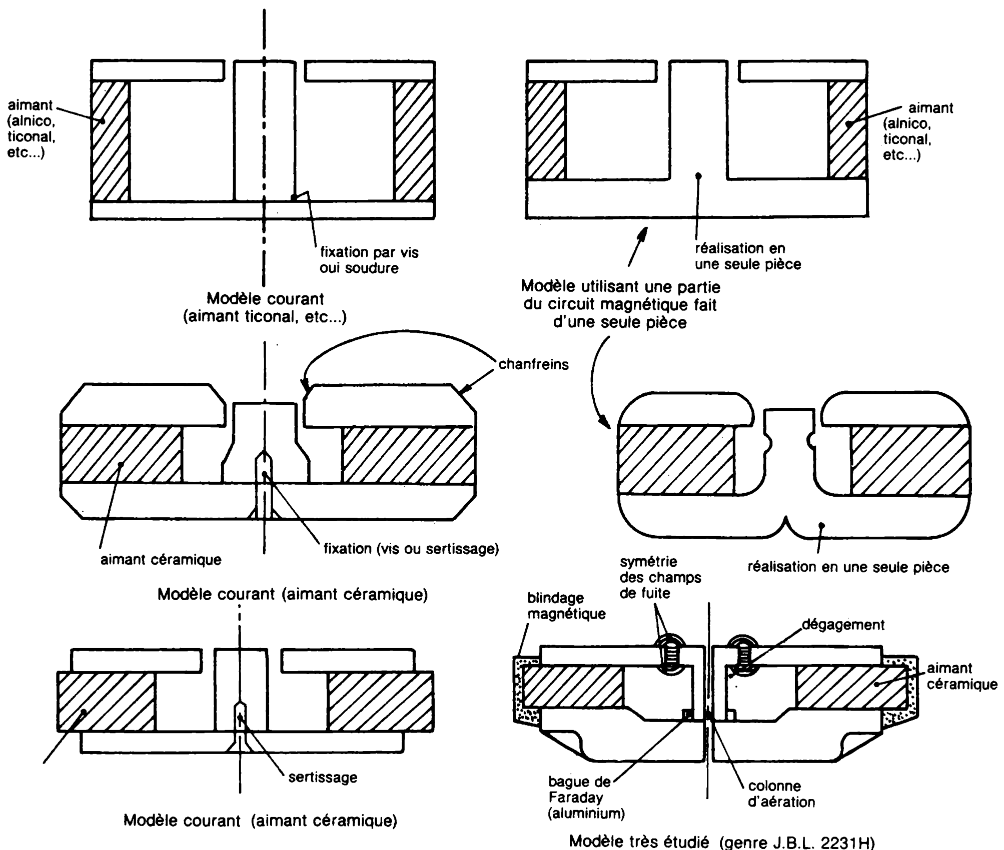



*Fig. 115 : Exemple de quelques circuits magnétiques à aimant périphérique, en forme de couronne. Ces aimants sont parfois de forme carrée. Ils sont également parfois réalisés en plusieurs parties. Dans presque tous les cas, les fuites magnétiques sont plus importantes que sur un moteur à aimant central.*

aussi chanfreiner le bord des pièces polaires (voir figure 115). D'autres solutions plus onéreuses existent mais sont moins utilisées. Une autre légère perte est apportée par le montage (sertissage ou vissage) du noyau sur la pièce polaire dorsale. La solution de la pièce polaire dorsale et du noyau réalisés en une seule pièce est beaucoup plus favorable mais son prix de revient est plus élevé.

Par ailleurs, l'aimant céramique, extrêmement dur, ne peut être travaillé facilement. Chaque forme demandera la construction d'un moule spécialement adapté, de prix de revient très élevé.

Pour les usages domestiques, ces aimants sont peu sensibles à la température (0,1 à 0,16 % par °C). Ils commencent à perdre leurs propriétés pour des températures inférieures à - 15°C. Il est préférable de les faire travailler pour une valeur de H légèrement réduite (par rapport à la valeur optimum).

Ces aimants sont, dans la grande majorité des cas, collés aux pièces polaires. Ils peuvent être également collés et vissés (vis traversant les plaques de champ). Dans de nombreux cas, ce collage présente le défaut d'une légère (ou parfois même notable) perte, par effet de fuite magnétique dû à l'épaisseur du collage (équivalent d'un mince entrefer). Certains constructeurs, soucieux de ces problèmes, soignent particulièrement le polissage des parties en contact ou utilisent certaines colles à la fois puissantes et très fluides (cyanoacrylate, Aron Alpha, Cyanolite etc.). Parfois, la colle n'est utilisée que sur les angles internes ou externes de l'aimant et des pièces polaires, quoique cette solution soit moins robuste mécaniquement.

A ces difficultés, pour la technologie de l'aimant en couronne, viennent s'ajouter les problèmes de linéarité de champ magnétique dans l'entrefer. Même pour un centrage paraissant rigoureux, une sonde de Gaussmètre montre qu'il existe des variations de champ, parfois assez notables, le long de celui-ci. L'homogénéité de l'aimant utilisé, la technique de magnétisation, les matériaux utilisés pour confectionner les plaques de champ et le noyau, la finition, la précision du montage sont autant de points qui vont déterminer cette caractéristique de linéarité.

Ces problèmes de non linéarité de champ magnétique dans l'entrefer sont d'ailleurs connus depuis Mac Lachlan.

**Linéarité de champ magnétique.**

La figure 116 montre la non-linéarité des champs de fuite d'un circuit magnétique conventionnel. La figure 117 montre d'autre part la non-linéarité de distribution du champ dans l'entrefer même. La bobine mobile, où va passer le courant correspondant au signal à transmettre, compte tenu de cette caractéristique , va se trouver en position instable par rapport à sa position de repos. En conséquence, il faudra prendre en considération la longueur de la bobine mobile ainsi que son amplitude de déplacement maximum acceptable (travail dans une zone relativement linéaire).

La figure 118 montre les variations de densité de flux, à travers l'épaisseur de l'entrefer. Cette caractéristique, connue depuis fort longtemps, a même été traitée longuement par Mac Lachlan dans son livre sur les haut-parleurs. D'après cette figure on remarque qu'en dehors de l'entrefer même des fuites sont notables, aussi bien du côté intérieur que du côté extérieur. La fuite est d'ailleurs plus importante du côté intérieur que du côté extérieur, en raison de la présence du noyau. Lorsque la bobine travaillera dans cet entrefer et que les forces de rappel (suspension, spider) seront faibles, la bobine pourra facilement, aux fréquences basses et sous une amplitude importante, sortir de l'entrefer (par bobine mobile est entendue la partie bobinée, le nombre de spires baignant dans le champ magnétique).

Une force de rappel importante (surtout sur signal transitoire) est donc nécessaire pour que la bobine mobile, après le signal, revienne à sa position de repos, le

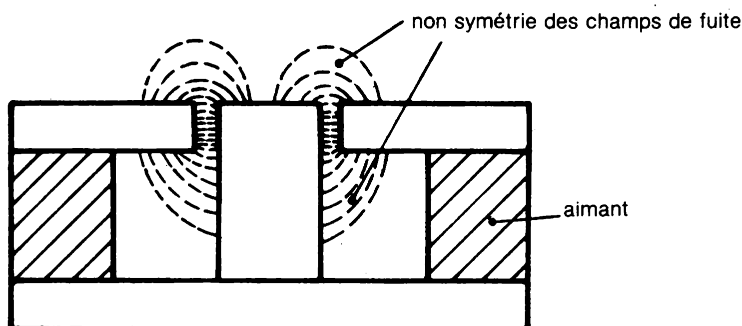



*Fig. 116 : Effet de non-symétrie des champs de fuite, dûe à la présence du noyau. Cet effet présente des inconvénients lors de l'utilisation d'une bobine mobile se déplaçant sur une trop grande amplitude (mauvaise linéarité de déplacement, instabilités etc...)*

point « zéro ». Sans cette force mécanique de rappel, la bobine sortirait de l'entrefer (inertie de la masse en mouvement).

Bien que l'analogie électro-mécanique ne soit pas tout à fait exacte, on peut considérer la figure 119 comme un équivalent, où la bobine mobile est soumise à un signal sinusoïdal. Au point de repos, on voit que la bobine mobile (ici simulée par un aimant) est en position instable : elle est maintenue dans cette position grâce aux forces de rappel mécaniques. Ce travail est, d'après les expériences, stable pour les fréquences inférieures à la fréquence de résonance principale, car l'accélération n'est plus suffisante pour provoquer l'instabilité. Pour ces fréquences très basses, la bobine, qui tendrait à sortir du champ magnétique est rappelée au point « zéro ». D'après les termes utilisés par Mac Lachlan, sa position est alors « rectifiée » (« Electro-mechanical rectification »). Pour les fréquences élevées, il peut se produire, pour une forte amplitude, un phénomène d'instabilité dû au fait que la perte de champ magnétique de chaque côté de l'entrefer n'est ni brutale, ni symétrique (figure 118). Cependant, l'amplitude ne sera pas assez grande pour que la

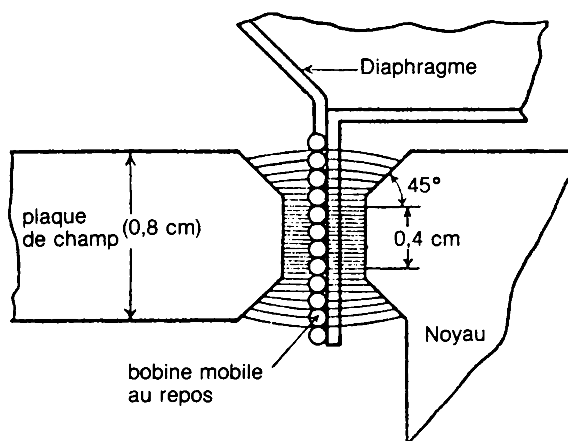



*Fig. 117 : Non linéarité de champ dans l'entrefer, problème déjà étudié en profondeur par Mac Lachlan dès 1934 (Loudspeakers, Mac Lachlan, Oxford Press)*

bobine mobile sorte de l'entrefer. Cette instabilité n'en n'est pas pour le moins importante, ceci d'autant plus que l'amplitude de vibration du diaphragme décroit rapidement lorsque la fréquence reproduite augmente.

Ainsi, pour les fréquences un peu plus élevées que la fréquence de résonance (et sous de fortes amplitudes de déplacement) le rapport courant/champ magnétique en chaque point du parcours de la plage de déplacement sera tel que les variations d'accélération de la masse en mouvement feront que la bobine ne pourra regagner son point milieu d'une façon similaire aux variations de courant. On aboutit donc à un déplacement, un « glissement » du point milieu (position zéro du travail) qui va varier selon l'amplitude et la fréquence. Mac Lachlan était déjà très conscient de ce problème. La figure 120 montre ce qu'il publiait à ce propos en 1934, concernant les conditions de stabilité et d'instabilité (selon l'équation de Mathieu) de l'équipage mobile.

Pour les fréquences plus élevées et comme dit plus haut, la bobine ne peut sortir de l'entrefer, mais il se produit malgré tout un déplacement du point de repos, du point « zéro ». La linéarité des champs de fuite, la longueur de la bobine mobile y jouent un rôle primordial (sans parler du comportement transitoire du système de rappel mécanique). Cette irrégularité dans la linéarité de déplacement de la bobine

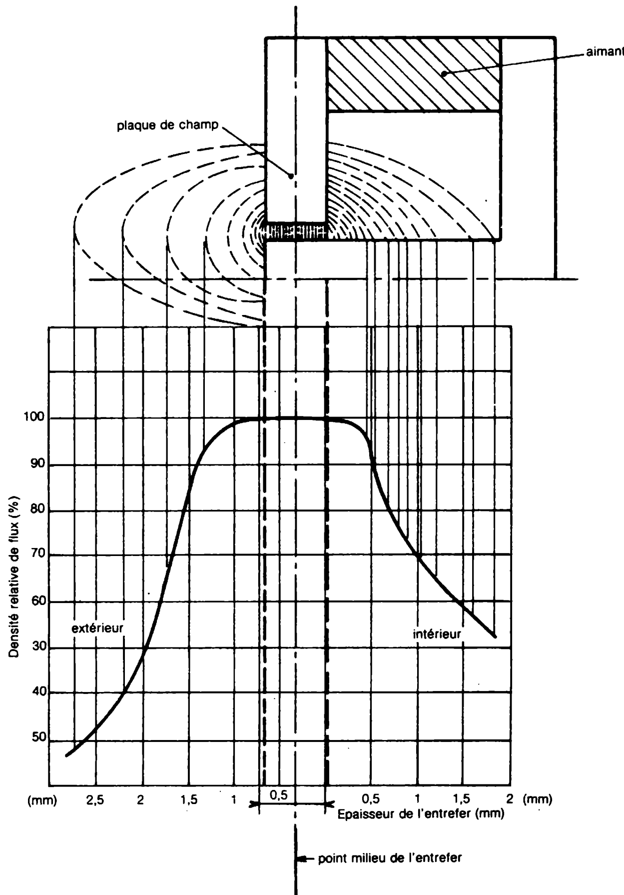



*Fig. 118 : Variation de densité de flux dans l'entrefer et en dehors de la plaque de champ. Cette caractéristique est assez variable suivant les configurations mécaniques et le type de matériaux utilisés.*

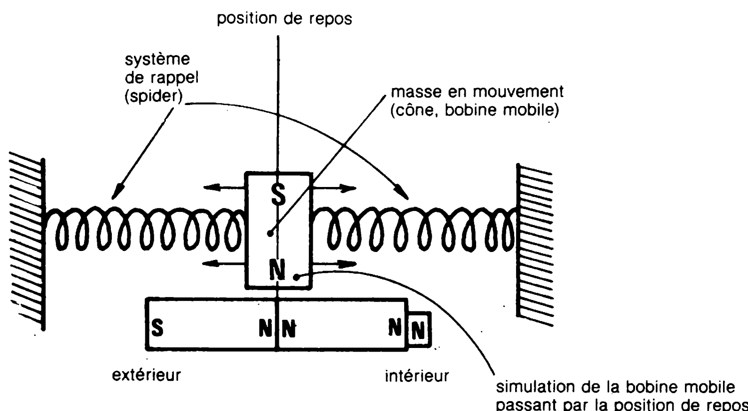



*Fig. 119 : Système simulant (bien qu'imparfaitement) l'équipage mobile, ainsi que l'effet de non linéarité de champ magnétique. Pendant une alternance et au moment du passage à la position de repos, la masse en mouvement ne revient à cette position que grâce aux forces de rappel mécaniques. Lors d'une forte amplitude de déplacement le point de repos « glisse », ceci étant dû à l'effet combiné de l'accélération de la masse en mouvement ne coïncidant plus avec la variation de courant. Plus le signal tend vers zéro et plus la position de la bobine mobile est dépendante des forces de rappel mécaniques.*

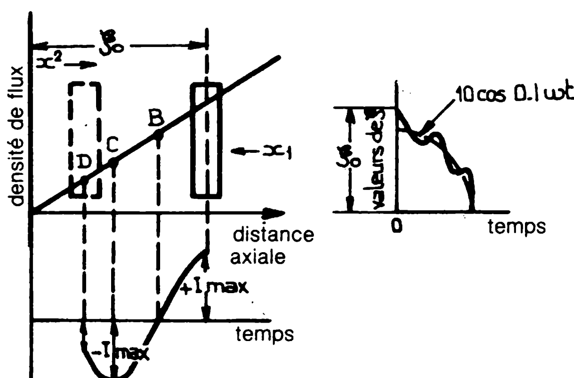



*Fig. 120 : Diagramme simulant l'effet « Electromechanical rectification », décrit par Mac Lachlan en 1934. Il montre, selon l'équation de Mathieu, que la bobine mobile, se déplaçant dans un champ magnétique radial non uniforme, est soumise aux effets d'accélération pendant son déplacement et voit son point de repos glisser. De plus, elle ne s'arrête plus de façon symétrique par rapport au point milieu, point de repos.*

mobile est un facteur important, jouant bien sûr sur la production de distorsions parasites.

Ce défaut, bien qu'important, n'est que rarement décrit dans les ouvrages sur les haut-parleurs. Seuls les travaux du célèbre Mac Lachlan, de Barlow, ce chercheur anglais connu, ainsi que ceux de Jacques Mahul (L'Audiophile n° 6, p. 59 à 65) relatent ces phénomènes.

## Comportement en courant alternatif des circuits magnétiques

Les caractéristiques d'un circuit magnétique pour haut-parleur électrodynamique sont généralement indiquées en régime statique ou en courant continu. Le facteur de force BL par exemple est mesuré par la méthode d'annulation de deux forces. Cette méthode de mesure se base sur un courant continu I traversant la bobine

mobile dont la longueur de fil est connue. Une bobine mobile classique étant normalement constituée de deux couches, les calculs d'inductance et de flux générés en courant alternatif se compliquent rapidement lorsque l'on souhaite obtenir une très bonne précision. On doit en effet prendre en considération non seulement la longueur de fil mais aussi la forme du bobinage et les effets d'annulation des champs magnétiques aux endroits où les spires viennent en contact les unes avec les autres, ainsi que la forme globale du champ magnétique généré non pas par une spire mais par la bobine toute entière. En courant continu, en régime statique, les choses ne sont pas si simples. Un des défauts du principe de transduction électrodynamique est dû au fait que, pour pouvoir se déplacer, la bobine mobile doit « prendre appui » sur le circuit magnétique, sur le champ plat et radial de l'entrefer. L'association de nombreuses spires produisant chacune un champ tournant conduit à un champ global de forme particulière. En plongeant dans l'entrefer, l'orientation des forces générées par la bobine soumise à un courant continu est telle que celle-ci tendra à se déplacer dans un sens, mais avec une certaine instabilité latérale rendant obligatoire un système de centrage par spider.

En courant alternatif, les choses se compliquent. Aux phénomènes d'instabilité de position de repos dont il a été question plus haut viennent se greffer d'autres problèmes, dont ceux du comportement en courant alternatif du circuit magnétique. La bobine ne peut plus être considérée comme une self à air, mais comme une self mobile sur noyau magnétique, ce dernier étant le circuit magnétique du haut-parleur. A ce sujet, il convient de ne pas perdre de vue que dans des conditions normales d'utilisation, la bobine mobile soumise au signal audio crée des variations de densité de flux dont les valeurs sont extrêmement faibles si on compare celles-ci à la valeur du flux dans l'entrefer du circuit magnétique. Il est relativement facile de visualiser les lignes de force ou les fuites d'un circuit magnétique, qu'il soit à aimant central ou à aimant en couronne. On peut employer soit la méthode classique de la limaille de fer, soit utiliser du « papier magnétique » semblable à celui de la figure 120(a). L'analyse du comportement du circuit magnétique en courant alternatif, c'est-à-dire lorsque celui-ci est soumis, au niveau de son entrefer, aux variations de champ magnétique produites par la bobine mobile dans laquelle passe un courant

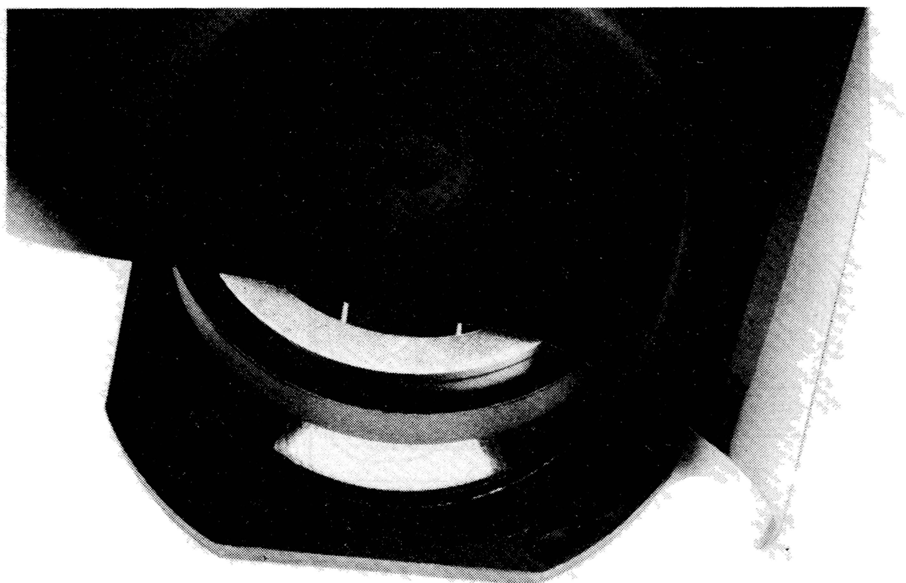


*Fig. 120(a) : Visualisation des champs de fuite d'un circuit magnétique obtenu grâce au « papier magnétique » (Magnetic Paper, 3M). Il a l'avantage d'être très pratique et de procurer une très bonne définition, ce qui n'est pas le cas de la limaille de fer.*

alternatif, est beaucoup plus difficile. D'éventuelles mesures ne présentent en effet d'intérêt que s'il est possible de les effectuer dans les conditions réelles de fonctionnement, celui-ci ne devant pas être influencé par ces mesures en courant alternatif.

Fin 1988, Omura, Okabé et Kuramochi, trois ingénieurs du groupe japonais Mitsubishi-Diatone ont réussi, grâce aux ordinateurs, à visualiser ce comportement en alternatif. Il existe bien sûr des gaussmètres équipés de sondes très sensibles (figure 120(b)), la mesure en courant alternatif à l'intérieur même d'un circuit magnétique étant beaucoup plus complexe. Sur trois circuits magnétiques décrits comme suit :

- à aimant ferrite en couronne,
- à aimant alnico central,
- à double aimant ferrite dont un en opposition,




*Fig. 120(b) : Gaussmètre portable à affichage numérique (F.W. Bell, U.S.A., modèle 4048).*

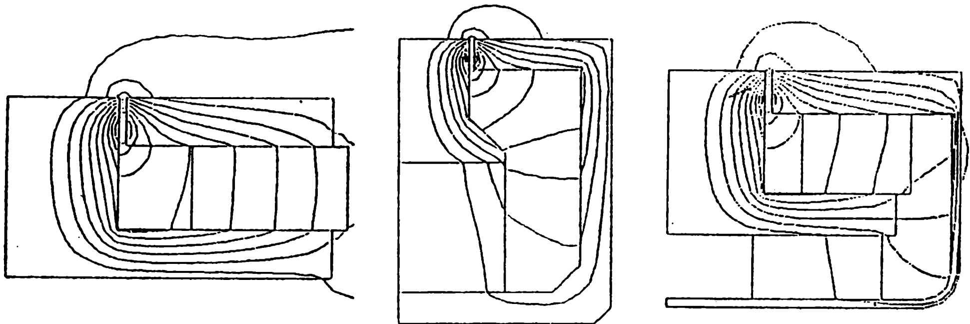


*Fig. 120(c) : Lignes de force réelles visualisées sur trois circuits magnétiques à aimant ferrite annulaire, à aimant alnico central et à double aimant ferrite dont un en opposition. Ces mesures sont effectuées en courant continu, celui-ci traversant la bobine mobile. On remarquera les non-linéarités des lignes de force réelles qui, au niveau de l'entrefer, tendent à se diriger vers l'extérieur dès qu'un courant continu est appliqué sur la bobine mobile. Cette étude facilite la compréhension des phénomènes d'instabilité de l'équipage mobile en régime dynamique (Laboratoires Mitsubishi-Diatone, octobre 1988).*

ces trois ingénieurs ont pu mettre en évidence de nombreux phénomènes de non-linéarité des lignes de force. La figure 120(c) représente les lignes de force visualisées sur ces trois circuits magnétiques, ceci en courant continu. Dès que la bobine mobile reçoit un courant continu, la forme des lignes de force des circuits magnétiques se modifie, ce qui démontre que la bobine mobile se comporte comme une self à noyau magnétique, l'une interférant sur l'autre. Au niveau de l'entrefer, les lignes de force que l'on croyait parallèles tendent à se diriger vers l'extérieur. En l'absence de courant continu, les lignes de force retrouvent presque leur bel aspect théorique. En soumettant cette fois la bobine mobile à un courant alternatif, on met en évidence des déformations des lignes de force qu'il aurait été difficile d'imaginer

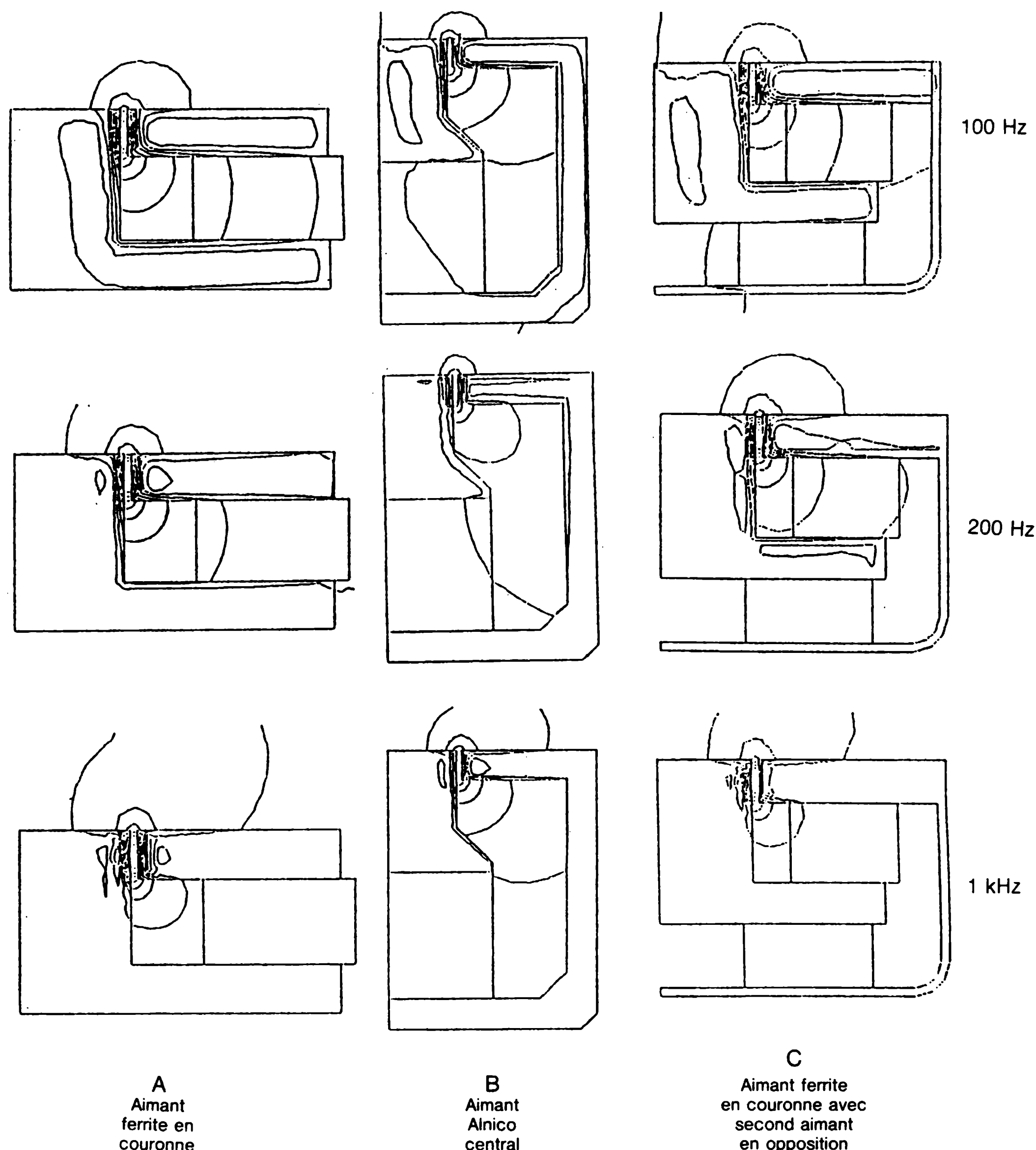



*Fig. 120(d) : Effet du courant alternatif (100 Hz, 200 Hz et 1 kHz) appliqué à la bobine mobile plongeant dans ces différents entrefers sur la géométrie des lignes de force de trois sortes de circuits magnétiques (Mitsubishi-Diatone, octobre 1988).*

sans l'apport de ces nouvelles mesures. Ces déformations des lignes de force sont représentées sur la figure 120(d).

A la fréquence de 100 Hz, de même qu'à 200 et 1 000 Hz, il se produit des déformations très importantes des lignes de force, y compris sur la version avec aimant alnico central. On constate soit une coupure des lignes de force qui se bouclent isolément (100 Hz, aimant ferrite annulaire), soit la formation de lignes de force verticales (et non horizontales) ou bien encore de forme elliptique de part et d'autre de l'entrefer. A 1 kHz et aux fréquences supérieures, le circuit à aimant alnico central procure les résultats les plus acceptables. Ces nouvelles mesures suffisent pour faire comprendre les problèmes de non-linéarité en courant alternatif que peuvent rencontrer les circuits magnétiques des haut-parleurs médium et aigu. Compte tenu de ces interactions entre la bobine mobile et le circuit magnétique, le noyau et la plaque de champ des haut-parleurs de très haute qualité méritent d'être réalisés autrement qu'à partir de fer doux. Les plaques de champ laminées (comme sur les transformateurs B.F.), les bagues de court-circuit, les formes très étudiées du noyau et du circuit magnétique assurent de faibles variations de densité de flux dans l'entrefer. Il faudra désormais y ajouter le comportement de ceux-ci en fonction de la fréquence.

Sur les haut-parleurs de grave, il est intéressant de connaître les caractéristiques de variation de densité de flux non seulement au milieu de l'entrefer, mais sur une excursion plus importante. Il est possible de reprendre l'expérience de la figure 118 et d'ajouter aux paramètres de niveau (ou de densité de flux) et de déplacement de la bobine dans l'entrefer, celui de la fréquence. Ce type d'expérience a été réalisé par les laboratoires japonais de la Nippon Colombia, au août 1978 et ont été publiés

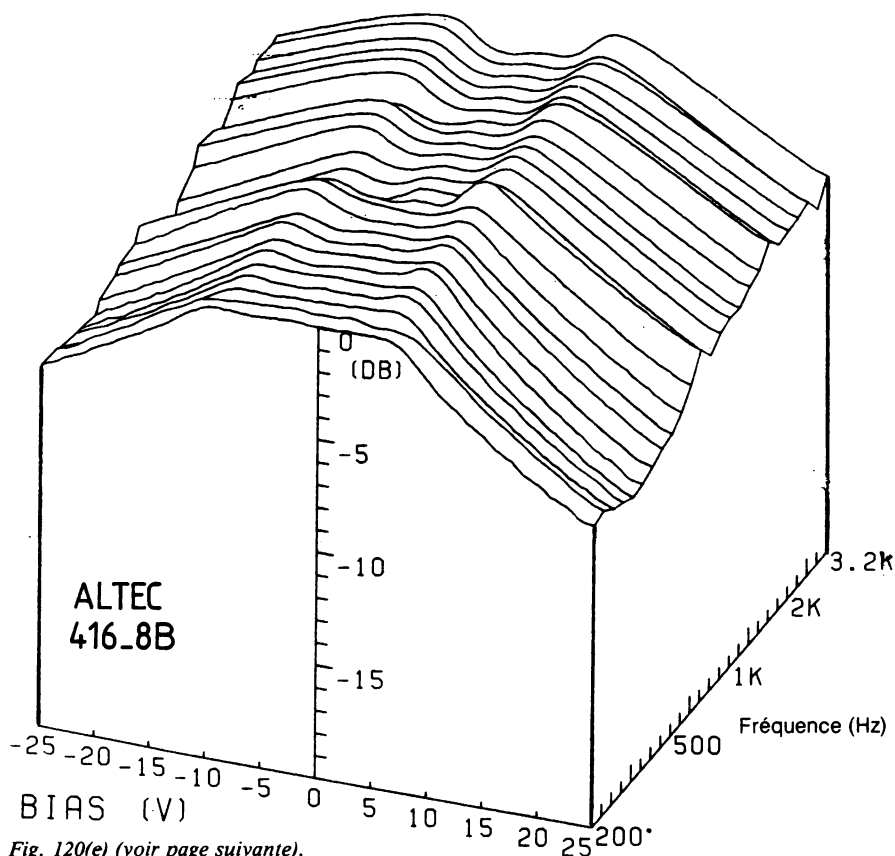



*Fig. 120(e) (voir page suivante).*

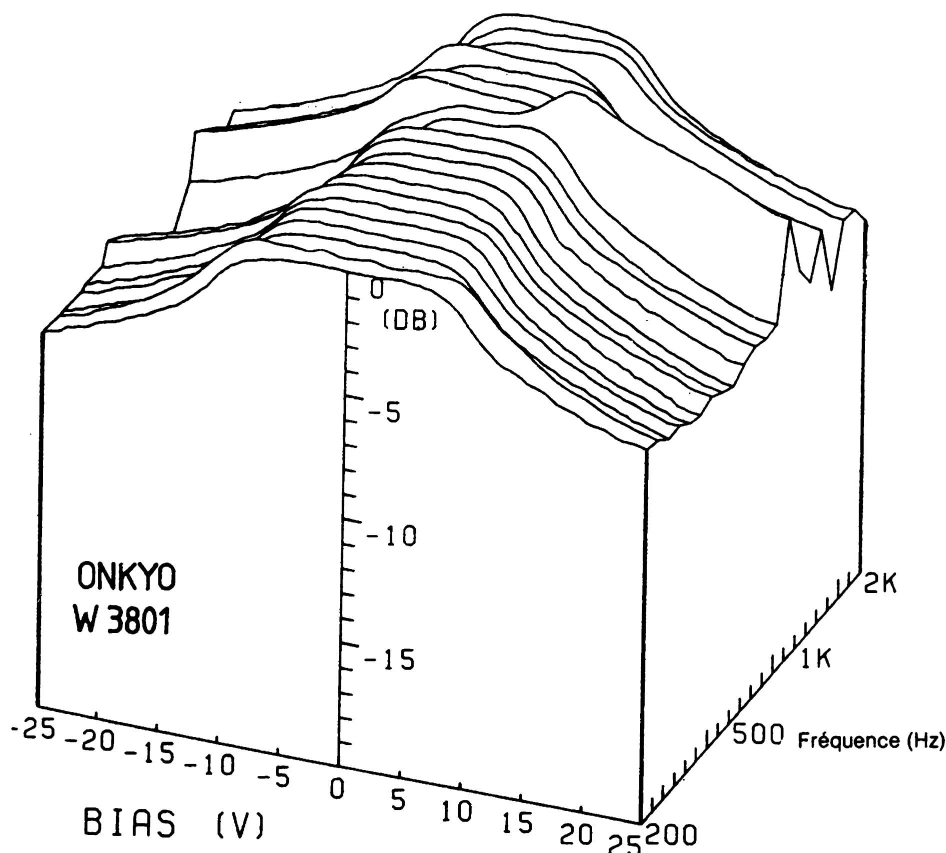



*Fig. 120(e) : Mesure de la variation de sensibilité de deux haut-parleurs graves en fonction de la fréquence pour différentes positions de la bobine mobile, celles-ci étant obtenues par superposition d'une polarisation continue variable (Nippon Colombia, Stereo Technic, août 1978).*

à la même date par la revue Stereo Technic. On trouvera sur la figure 120(e) deux courbes tridimensionnelles de haut-parleurs graves de diamètre 38 cm. Ces courbes ont été obtenues sur ordinateur. Cette expérience a consisté à mesurer l'efficacité du haut-parleur en fonction de la fréquence et de la position de la bobine mobile dans l'entrefer. La plage de fréquence utilisée est comprise entre 200 Hz et 3,2 kHz, la bobine mobile qui reçoit ce signal étant soumise également à une tension continue variant entre – 25 V et + 25 V, l'ensemble de la mesure étant effectué pendant un temps très bref de façon à éviter tout risque d'échauffement de la bobine mobile. A noter que cette mesure tient compte à la fois de la linéarité mécanique de la suspension et de la linéarité de densité de flux sur une excursion importante.

Le laboratoire Nippon Colombia (Denon) avait, à cette époque, complété ces mesures par des tests sur trains d'ondes pour des positions équilibrées ou déséquilibrées de la bobine mobile, ces dernières étant obtenues par superposition d'une polarisation en courant continu positif ou négatif de la bobine mobile sur le signal appliqué à celle-ci. Sur ce test de trains d'ondes, que l'on trouvera représenté sur la figure 120(f), il est mis en évidence le fait que lorsqu'on applique aux bornes de la bobine mobile d'un haut-parleur un léger courant continu superposé à un signal audio sinusoïdal comportant des portions croissant ou décroissant régulièrement en amplitude il se produit, selon le haut-parleur testé, des instabilités de déplacement de l'équipage mobile. Ces instabilités sont facilement mises en évidence à

l'aide d'un microphone de mesure, d'un amplificateur et d'un oscilloscope. Cette constatation faite par Ken O Kahara et par les laboratoires de la Nippon Colombia en 1978 montre que pour ainsi dire tous les haut-parleurs, quel que soit leur principe de transduction, sont affectés d'une forme de distorsion dont on parle peu, qui est celle de la non-linéarité de réponse non pas sur le paramètre classique d'amplitude/fréquence, mais sur celui de l'amplitude. Si d'un côté, le test des trains d'ondes permet de mettre en évidence des phénomènes de résidus vibratoires au sein de la membrane après un train d'onde, ou bien encore le temps d'établissement du signal d'attaque, le test effectué par les laboratoires Nippon Colombia apporte une certaine lumière sur les incidences de ces instabilités de réponse en amplitude sur la qualité subjective. En effet, la musique et son environnement acoustique comportent de nombreux signaux de ce genre tels que les notes soutenues, les fins de note, les informations de réverbération. On imagine facilement les conséquences des instabilités constatées sur le résultat d'écoute : fin de note décroissant régulièrement en amplitude prenant un aspect plus ou moins chevroté, trémolos et vibratos perturbés dans leur rythme en amplitude et en fréquence. Aujourd'hui, grâce au procédé numérique, il doit être possible de concevoir des synthétiseurs offrant à la fois une grande pureté spectrale et des trains d'ondes modulés à la fois en amplitude et en fréquence : trains d'ondes triangulaires, exponentiels ou irréguliers. Ce nouveau type de mesure devrait permettre d'accéder à de nouvelles méthodes de mesure dont la corrélation avec la qualité sonore semble évidente.

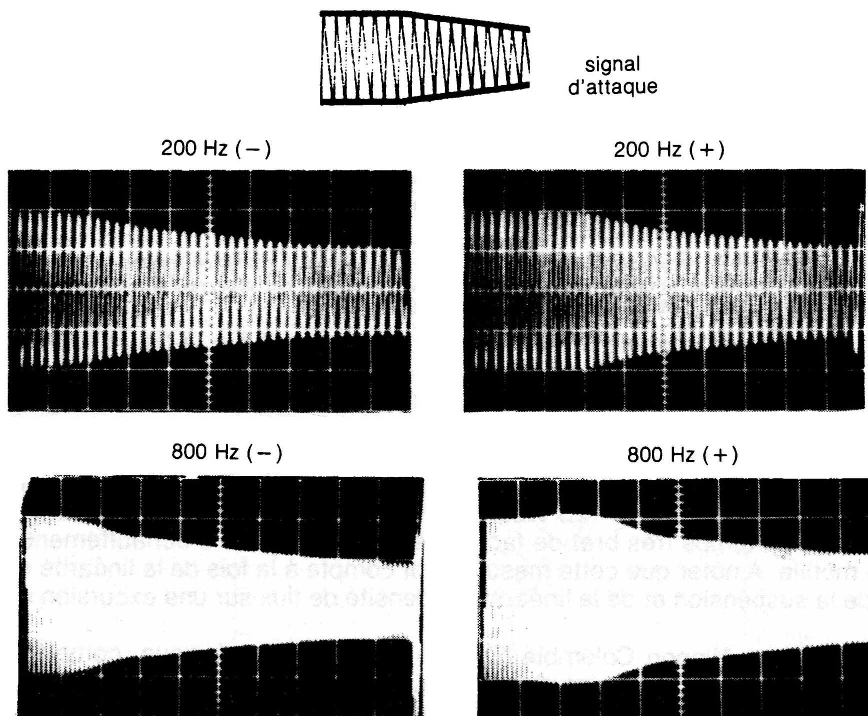



*Fig. 120(f) : Réponse sur trains d'ondes modulés et superposés à un courant continu de faible valeur positif ou négatif d'un haut-parleur de bonne qualité de diamètre 38 cm aux fréquences de 200 et 800 Hz. Le signal de référence comporte une partie stable en amplitude suivie d'une partie décroissant régulièrement en amplitude. Il est mis en évidence, à 200 et surtout à 800 Hz, des distorsions d'amplitude.*

## Longueur de la bobine mobile, structure de celle-ci

Lors de la 50 ème Convention de l'AES, l'Anglais Barlow démontra que la force motrice n'est pas linéaire à partir du point milieu (point de repos de la bobine mobile). Cette force s'abaissera par ailleurs d'autant plus rapidement que la valeur du flux même diminuera. On est donc contraint d'utiliser soit des plaques de champ très épaisses (ce qui n'est guère respecté pour des raisons de prix de revient), soit de faire travailler la bobine dans une plage de déplacement relativement limitée, où le flux est constant (ce qui n'est pas respecté non plus dans la plupart des haut-parleurs grave actuels). Concernant ces divers propos, le chercheur japonais K. Ikéda, fort connu pour ses connaissances très larges en électro-acoustique, disait ironiquement, à propos de la différence existant entre les haut-parleurs actuels et les bons vieux haut-parleurs d'antan :

- « Autrefois, les bons haut-parleurs faisaient du bruit et non du vent. Ceux que l'on trouve actuellement font exactement le contraire : ils font plus de vent que de bruit (allusion aux phénomènes d'instabilité notés ci-dessus, ainsi qu'aux effets de la fréquence de résonance beaucoup plus basse) ». Et il donnait en exemple les mauvais ventilateurs faisant plus de bruit que de vent (allusion à un fonctionnement tout à fait opposé à ce que l'on recherche).

Une autre solution est celle de la bobine mobile très longue. Là aussi, cette condition n'est que rarement respectée, car celle-ci, même dite « longue », ne l'est jamais suffisamment assez pour procurer l'effet de compensation recherché.

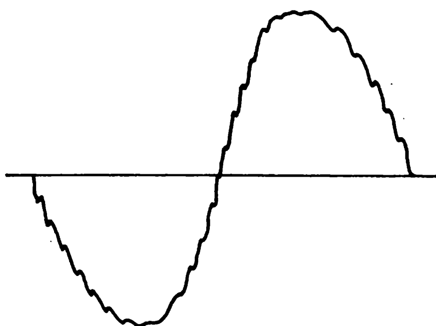


*Fig. 121 : Effet d'instabilité (très amplifié) dû aux interactions masse en mouvement/système de rappel/champ magnétique non uniforme/puissance du champ magnétique. Il peut se produire sur des systèmes à membrane trop lourdes et des aimants trop faibles, un effet que l'on pourrait assimiler par l'avance par à coups d'un moteur de couple trop faible mettant en mouvement une masse élevée.*

Pour en revenir au chapitre précédent, il faut ajouter, ce qui est passé souvent sous silence, que l'instabilité due à l'accélération et au contrôle imparfait de la masse en mouvement (alliée à la non-uniformité du champ où s'effectue le déplacement de l'équipage mobile) ne provoque pas seulement qu'un « glissement » du point de repos. Il se produit également des irrégularités dans le mode de déplacement de cet équipage mobile.

On assiste, pour des raisons de masse en mouvement, d'accélération, de force motrice faisant « ce qu'elle peut » pour contrôler la masse mobile, à une sorte d'avance par « à coups », assimilable à celui grossièrement décrit sur la figure 121. La raison principale de cet effet est, très certainement, non pas la valeur seule de la masse en mouvement, mais plus précisément le rapport force motrice/masse en mouvement, ainsi que les autres conditions de surface vibrante et de surface mue.

## L'effet de « roulis »

Le haut-parleur de principe Rice-Kellogg comporte une suspension périphérique et un « spider », afin d'empêcher un autre problème propre à ce haut-parleur, le « roulis » (ou balancement). Il en sera également question plus loin. Cet effet sera amplifié sur les grandes élongations, car l'instabilité existe non seulement dans le sens du déplacement mais aussi latéralement (à 90° par rapport au sens de déplacement). Une bobine longue exige donc un entrefer plus large afin d'éviter les contacts mécaniques (sous forme de frottements parasites de la bobine mobile contre les parois de l'entrefer). L'effet de roulis n'en sera pas pour autant supprimé (entrefer plus large) et, d'après les mesures effectuées sur les haut-parleurs présentant ce défaut, il semble être la source de distorsion par harmonique 3.

## Epaisseur de la plaque de champ

Une plaque de champ de 10 mm d'épaisseur s'accompagne d'un champ magnétique uniforme sur environ 7 mm seulement. Si l'on prend une bobine courte, de 4 mm de long par exemple, l'amplitude de déplacement dans une plage vraiment linéaire ne serait plus que de 1,5 mm, soit une élongation maximale de 3 mm, ce qui est très peu (et bien en dessous des conditions de travail de la plupart des haut-parleurs de grave actuels). Généralement, pour des questions de prix de revient, ces conditions ne sont pas respectées. Le prix de revient des plaques de champ très épaisses est élevé et le fil composant la bobine mobile ne peut avoir une section trop réduite sous peine de

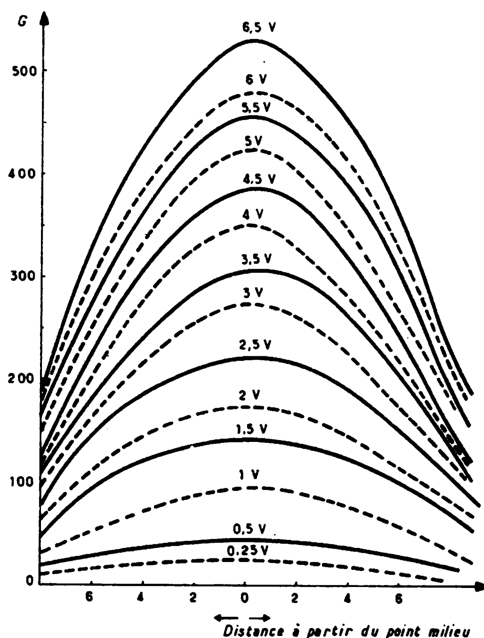



*Fig. 122 : Variation du champ magnétique en fonction du déplacement, de part et d'autre de la position de repos de la bobine mobile. (d'après J. Mahul, L'Audiophile, n°6, p.64).*

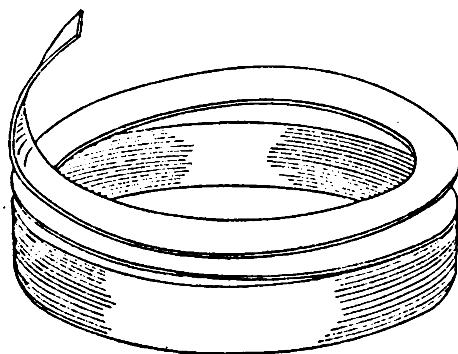


*Fig. 123 : Bobine mobile utilisant un fil plat, réalisée dès 1926 par Wente et Thuras et destinée à la chambre de compression Western Electric 555 W.*
*L'invention de cette bobine à fil plat revient à L.N. Hampton, R.O. Mercner et J.L. Mathison (1925).*

sévères limitations de dissipation thermique admissible (on augmenterait la résistance en continu, avec un courant admissible moindre).

Dans presque tous les cas, la variation de champ, de force motrice en fonction du déplacement de la bobine transductrice est très importante. Barlow et bien d'autres spécialistes on évoqué ce problème (figure 122). On voit, sur cette figure, que seule une zône de déplacement extrêmement réduite doit être considérée comme linéaire.

L'examen de cette figure montre aussi que l'équipage mobile, qui se trouve momentanément en position de « repos » (ce n'est pas celle du point « zéro ») aux maximum d'amplitude positive ou négative subit, à partir de ces positions, une accélération. Pendant son déplacement, l'équipage mobile aura aussi tendance à vouloir se déplacer au delà et en deçà de sa plage de fonctionnement (effet de la masse en mouvement). L'équipage mobile devrait en fait recevoir une force motrice variant selon des courbes inverses de celles de la figure 122, pour compenser cette non linéarité. Ce gros défaut est sans doute à l'origine d'une des caractéristiques du haut-parleur électrodynamique de Rice-Kellogg : la non-linéarité dynamique, dûe à la diminution rapide de la force motrice dès que la bobine mobile quitte sa position de repos. Sur signal transitoire, cet effet se fera ressentir encore plus. Mais ce mal, généralisé sur bien des haut-parleurs actuels, est un problème sur lequel l'industriel ne peut que fermer les yeux : une amélioration sur ce point serait tout à fait « anti-commerciale », faisant augmenter considérablement le prix de revient. Prix de revient que les ordinateurs, que l'on croit (malheureusement trop souvent) destinés à « optimiser les performances » s'efforcent en fait d'optimiser la rentabilité, les performances n'étant plus le but primordial. Ceci est une nuance de taille.

**Support de la bobine mobile**

Au sujet de la bobine mobile, le choix de son support semble fortement influencer la qualité sonore. C'est en effet à cet endroit que la force motrice va être transmise à la membrane. Il en est de même pour la technique du collage des spires sur ce support. En général, ce support est en papier. Sur certains haut-parleurs de grave à bas rendement, où apparaissent des contrain-

tes thermiques, ce support peut être réalisé en aluminium. Lorsque les conditions de masse de la bobine mobile sont primordiales, le support est simplement supprimé. Les spires de la bobine sont alors collées entre-elles, pour former un mandrin rigide grâce à deux ou plusieurs couches, le tout étant collé directement à la membrane. Le collage « indirect » peut trouver une explication de découplage mécanique volontaire, donc recherché (haut-parleur de grave ou de médium), ou encore une autre raison : la tenue thermique. Certaines membranes présentent, certes, certaines qualités acoustiques (polypropylène par exemple), mais aussi une mauvaise tenue en température. On peut alors utiliser des découplages « thermiques » à l'aide de divers matériaux (papier par exemple).

Un autre inconvénient du polypropylène est un collage particulièrement difficile car peu robuste sans l'aide de colles spéciales. Pour ces matériaux, la technique du découplage « thermique », consistant à isoler la membrane de la bobine mobile, par l'intermédiaire de matériaux tels que le papier est l'une des plus pratiques. Elle a été appliquée, avec succès, sur quelques haut-parleurs de qualité, sans pour autant poser ces problèmes de fragilité mécanique.

### Fil composant la bobine mobile

Le fil de la bobine mobile est en général un fil émaillé de section ronde. Parfois, il est fait usage de fil de section ovale ou applatie. On rencontre aussi du fil dit « plat », un ruban qui est pré-formé (en spirale) en fonction du diamètre à bobiner. Pour celui-ci l'opération de bobinage est plus délicate. La figure 123 montre un bobinage réalisé en fil plat et utilisé dès 1926 par la firme américaine Western Electric. L'avantage du fil plat est, selon ses inventeurs, une plus grande rigidité mécanique sous contraintes thermiques ainsi qu'une plus grande légèreté dûe à l'absence de support.

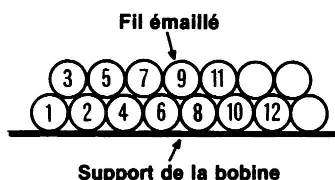



*Fig. 124 : Méthode de bobinage appelée « Bank winding », à faible capacité parasite.*

Le bobinage se fait en une ou plusieurs couches. Le bobinage en deux couches est le plus pratiqué, car il permet de placer le départ et l'arrivée des fils de connexion au sommet de ce bobinage, du côté du collage de l'ensemble sur le diaphragme, en évitant la surépaisseur qui proviendrait du « retour » du fil devant revenir à son point de départ. Il existe quelques variantes dans les méthodes de bobinage, comme le « Bank Winding » (figure 124) guère utilisé, dont le but est de diminuer l'effet de capacité parasite. De même, le type de bobinage dit « nid d'abeille », très souvent utilisé en haute fréquence n'est jamais utilisé sur les haut-parleurs.

En général, le fil est en cuivre. Ce métal est le plus pratique, le plus robuste, le plus maniable lors de l'opération de bobinage et le moins onéreux. On trouve aussi parfois du fil émaillé en cuivre argenté, en argent cuivré et en aluminium cuivré. Le

fil d'aluminium, d'une densité plus faible que celle du cuivre sera intéressant pour certaines applications telles que les équipages mobiles très légers. Il présente par contre les défauts d'une soudure difficile et parfois peu fiable dans le temps, ainsi que d'une plus grande fragilité mécanique lors de l'opération de bobinage et de montage. Cette soudure présente souvent une résistance électrique plus élevée que le reste (bobine mobile, fils de liaison entre la membrane et les bornes du chassis). De ce fait, un courant trop important peut provoquer à cet endroit une rupture (thermique) du circuit composant l'équipage mobile. L'aluminium a aussi le fâcheux défaut de provoquer des effets électro-chimiques à l'endroit de la soudure, qui rendront ainsi cette soudure de plus en plus fragile mécaniquement (et de plus en plus résistante électriquement). La soudure par ultra-sons, consistant à plonger le fil d'aluminium dans un bain de soudure vibrant à une fréquence comprise entre 18 et 21 kHz est très efficace. On trouve également de bonnes soudures spéciales pour aluminium (voir à ce sujet le chapitre concernant le haut-parleur Orthophase). Rappelons que certaines de ces soudures, comme les modèles « Alusol 45D » de la firme anglaise Multicore sont très pratiques, bien qu'exigeant un nettoyage complet des résidus de flux de soudure après cette opération (ces résidus étant mauvais isolants et corrosifs).

Certaines firmes vendent du fil émaillé dit « auto-collant » (self-bonding wire), c'est à dire utilisant un vernis spécial, un émail qui, une fois chauffé (passage d'un courant dans le bobinage après sa mise en forme) se colle par polymérisation. Cette opération, à présent parfaitement au point, permet un très bon collage, sans augmentation de masse et sans risques de dispersions dûes à l'apport extérieur d'une colle. Elle est couramment utilisée lors d'une fabrication en série. Aux U.S.A., la firme Altec a été l'une des premières à avoir remarquablement bien mis au point cette méthode, dont l'avantage était, entre autre, un durcissement de l'émail devenant particulièrement résistant à la température. Ce n'est que presque 20 ans plus tard que les firmes japonaises ou européennes purent égaler, voire dépasser ces performances. Certaines technologies permettent de réaliser des bobines mobiles particulièrement résistantes à la chaleur, pouvant supporter, en permanence ou presque, des températures voisinant 200 °C, ce qui permet de réaliser des haut-parleur de très forte tenue en puissance. Dans ce domaine, les progrès sont très nets depuis les premiers haut-parleurs.

Pour les impédances, celles-ci sont variables, partant de 1 à 800 Ohms, suivant les utilisations. Pour les impédances standard, elles sont de 4, 8 et 15 ou 16 Ω, ce pour les modèles actuels.

Concernant le collage, si le liant est trop souple, il peut apporter un effet de découplage mécanique, qui se fera ressentir aux fréquences élevées.

Pour les grands diamètres et pour en revenir au support de la bobine mobile, il est assez courant que la partie supérieure de ce support comporte des perforations, des trous. Ces trous ont pour but d'amenuiser l'effet de cavité (cavité se trouvant entre le noyau et le cache-noyau).

### Dôme anti-poussières

Il est nécessaire de protéger l'entrefer de toute poussière (limaille de fer en particulier). A cet effet, du côté extérieur de la bobine mobile, la configuration actuelle du spider en tissus gaufré protège efficacement le haut-parleur. Du côté intérieur, on utilise fréquemment une protection anti-poussière, appelée couramment « dôme anti-poussières » ou encore « cache-noyau ». Cette protection est faite soit d'un disque soit d'un dôme réalisé en diverses matières : feutre mou, tissu souple ou rigidifié, papier moulé en forme de dôme. Ce der-

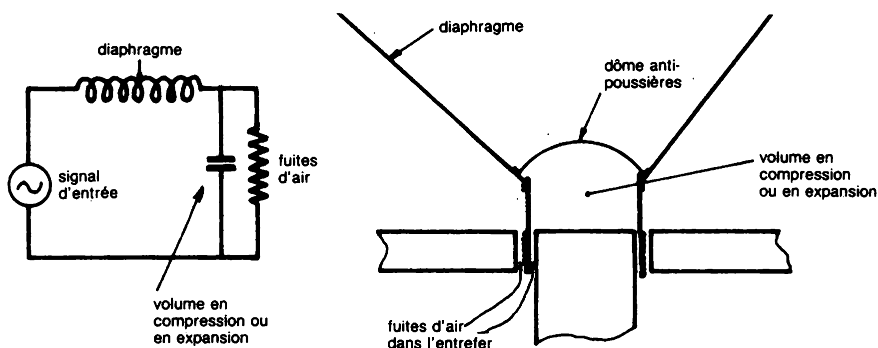



*Fig. 125 : Dôme anti-poussières hermétique provoquant une irrégularité par phénomène de cavité. Cet effet avait déjà été analysé par Mac Lachlan en 1934.*

nier cas, le plus courant, provoquera une résonance parasite, une résonance de cavité, se situant en effet entre le dôme protecteur et le noyau. Ce défaut, dû à l'expansion et à la compression de l'air inclus dans ce petit volume, était déjà connu de Mac Lachlan (figure 125). Cette protection a fait l'objet de nombreuses études et de brevets de protection, pour des formes souvent très étudiées. Quelques idées retiennent l'attention, comme celles proposées par exemple par J.B.L. aux U.S.A. ou Aurex (alias Toshiba, Japon), consistant à utiliser un dôme de protection concave, avantageux du point de vue directif.

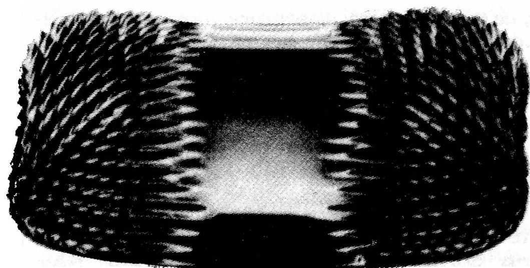
### Fils de liaison bobine mobile/bornes du H.P.

Il est nécessaire de relier, bien évidemment, les sorties de la bobine mobile aux bornes du haut-parleur. Les fils émaillés composant le bobinage étant fragiles, la plus grande majorité des haut-parleurs (sauf exceptions telles que les haut-parleurs de petit diamètre, les haut-parleurs à dôme etc.) doivent utiliser un raccord très souple, soudé près du support de la bobine mobile. Les fils effectuant la liaison membrane/bornes du H.P. doivent être particulièrement souples et surtout très résistants. Ces fils, presque toujours non isolés (ce qui est inutile) sont souvent tressés à partir de fils fins, réalisés en cuivre ou en alliage étudié pour résister aux risques éventuels de cassure. C'est pour le haut-parleur électrodynamique de Rice-Kellogg, un inconvénient inévitable aux effets heureusement peu sensibles sur les performances. Parfois, ces fils peuvent entrer en vibration à certaines fréquences, mais il est rare que ceux-ci apportent des vibrations audibles. Placés sur un côté du système, on pourrait penser à un déséquilibre dynamique éventuel de la masse en mouvement, ce qui pourrait en effet se produire si l'on avait affaire à des fils trop rigides. En Grande Bretagne le célèbre docteur Ferranti, à qui l'on doit d'admirables réalisations dans le domaine du haut-parleur de qualité, avait pensé, dès 1935 à remplacer les fils souples, « flottant » entre la base de la membrane et les bornes du haut-parleur par des rubans collés sur le spider. Formant un angle de 120 ° entre-eux, un troisième ruban (non relié électriquement) était, lui aussi, collé sur le côté opposé du spider, afin d'équilibrer les différences éventuelles de souplesse.

A l'endroit de la jonction fil émaillé/fil souple de liaison se trouve souvent un oeillet, pris dans la matière composant la membrane. Cet oeillet est prati-

que et permet de supporter la soudure des deux fils. La partie située entre la sortie du fil venant de la bobine mobile et l'oeillet est le plus souvent enduite (colle ou vernis), afin d'éviter une vibration parasite, ainsi qu'un risque de rupture thermique (le collage et le diaphragme faisant plus ou moins office de radiateur). Souvent, pour une question d'ésthétique, cette partie est masquée par le dôme anti-poussières. Pour les haut-parleurs à longue excursion, la longueur du fil souple est relativement critique. Trop longue, les fils souples viendraient en contact intermittent avec la membrane. Trop courte, ces fils risqueraient de se rompre.

Les variétés de fils souples pour cette utilisation sont relativement nombreuses, bien que revêtant presque toujours l'aspect du fil tressé. Le diamètre de ces fils est variable et dépend de l'utilisation. Pour les tweeters et certains haut-parleurs à dôme de médium et d'aigu, l'amplitude de déplacement très faible permet de faire sortir directement les fils venant de la bobine mobile et de souder ceux-ci sur les bornes situées à proximité. Pour éviter les risques de vibrations parasites ou encore un alourdissement de l'équipage mobile dû au collage des fils émaillés sur la membrane, ces fils relient en boucle les bornes du H.P. Dans ce cas, seules les parties de la membrane traversées par les fils ont un œillet ou une goutte de vernis.



*« Ferro-fluide », liquide magnétique, récemment utilisé sur de nombreux haut-parleurs. Il est composé d'une base (huile spéciale) dans laquelle sont incorporées des microscopiques particules magnétiques. Introduit dans l'entrefer des tweeters, il apporte de nombreux avantages (dissipation thermique en particulier). Comme le montre la photo ci-dessus, ce liquide est attiré par les aimants.*

Pour les tweeters, il est fait d'autre part usage de « Ferro-fluide », un liquide de couleur noire aux propriétés magnétiques intéressantes. Bien que l'invention semble remonter aux années 1970 (Philips), le fabricant le plus connu est la firme américaine Ferrofluidics Corporation de Burlington (MA). Les avantages de ce liquide restant prisonnier dans l'entrefer, sont, entre autre, une meilleure tenue en puissance et des avantages concernant l'étanchéité, la caractéristique d'impédance, l'amortissement mécanique et l'homogénéité du flux dans l'entrefer.

### Suspension, système de centrage

L'équipage mobile (diaphragme + bobine mobile) devrait théoriquement se déplacer uniquement selon un mouvement longitudinal. Cela n'est pas possible si une seule suspension est utilisée. Retournons une fois encore à l'époque de Mac Lachlan où nous sommes surpris par la constatation de ces phénomènes à une époque aussi lointaine. La figure 126 montre ce que Mac Lachlan publiait sur ce sujet en 1934.

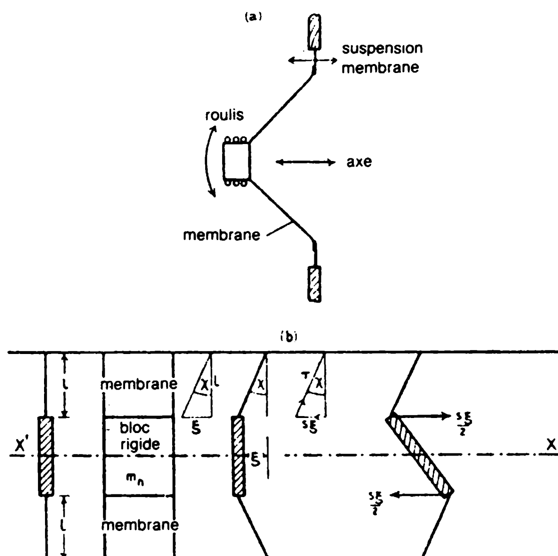



*Fig. 126 : Effet de roulis, de balancement du diaphragme, lorsque celui-ci n'est muni que d'une suspension. (d'après Mac Lachlan, Loudspeakers, 1934).*

On y voit que, sans suspension centrale, située très près de la bobine mobile, l'équipage mobile est sujet à un effet de « roulis » (en anglais « wobble », signifiant vacillement). En fait, si l'énergie motrice était réellement unidirectionnelle, ce système de centrage ne serait pratiquement plus nécessaire. Sa nécessité confirme bien que cette énergie motrice longitudinale s'accompagne s'une sorte de composante latérale, très facilement ressentie sur de fortes amplitudes (la bobine mobile venant en contact transitoire avec les pièces polaires).

Selon Kagéyama (voir chapitre sur les haut-parleurs plans) ce résidu de déplacement latéral, inévitable, s'ajoutant au mouvement longitudinal principal est tout à fait comparable à une corde de violon qui, bien que frottée dans un sens bien déterminé, n'est pas « guidée » et, en conséquence, libre d'osciller dans n'importe quelle direction.

Cette suspension centrale, nécessaire, ne devrait normalement pas gêner le mouvement du diaphragme.

Elle devrait donc être très souple. Mais elle doit aussi être capable de ramener, après un signal, l'équipage mobile à sa position de repos. Elle doit aussi permettre un centrage rigoureux de la bobine mobile dans l'entrefer.

Ces exigences sont assez contradictoires. En effet, un spider trop souple, sans résonance gênante, capable de supporter un déplacement longitudinal important sans résistance mécanique offrira, par ailleurs, un mauvais centrage et donnera à l'équipage mobile une position de repos peu précise (force de rappel trop faible). Inversement, une suspension très rigide, donnant une position de repos précise et une force de rappel importante, aura de fortes chances d'apporter des résonances parasites. Elle fera aussi s'élever la fréquence de résonance principale du haut-parleur.

Les premiers spiders étaient de type central (visibles de l'avant, car placés au centre de la bobine mobile, sur le noyau). Ces systèmes étaient fixés en leur centre, sur la pièce polaire, et leur pourtour était collé sur la bobine

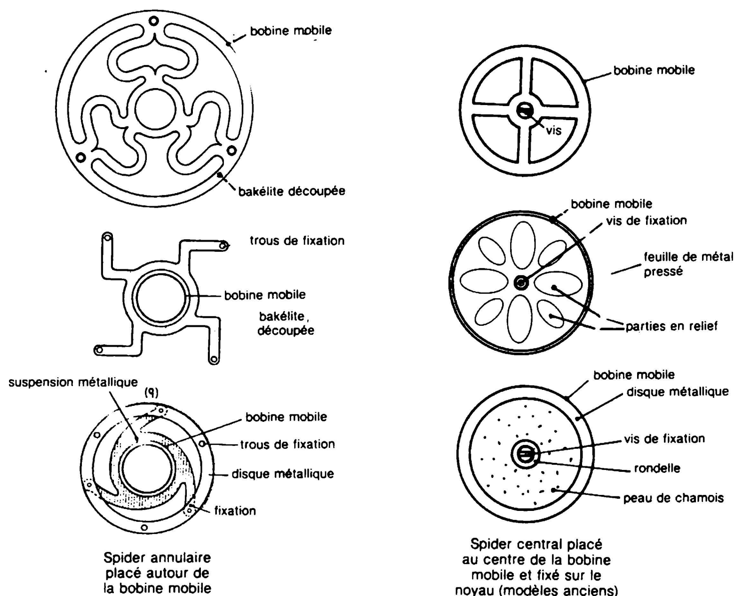
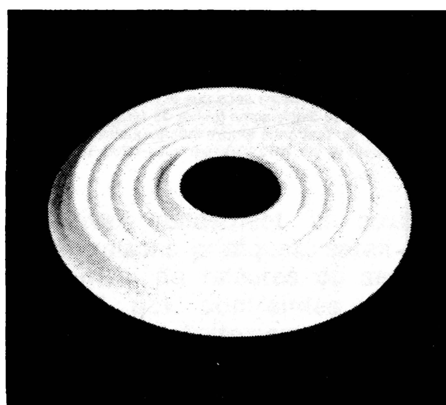



*Fig. 127 : Formes de spiders de centrage, placés soit autour de la bobine, soit au centre de celle-ci.*

mobile, comme sur le haut-parleur de Rice-Kellogg.

Le matériau utilisé était soit de la bakélite, soit une fine peau de chamois. Lorsque la bakélite était choisie, c'était sous la forme d'un disque plan comportant des découpes semblables à celles de la figure 127. Ce disque pouvait également, selon le même principe, être réalisé en métal nervuré de faible. épaisseur, ce qui offrait l'avantage de donner un « spider » (du mot anglais signifiant « araignée », « armature ») hermétique, ne laissant pas pénétrer les poussières dans l'entrefer. Il remplit dans ce cas le rôle de cache-noyau, utilisé aujourd'hui contre la pénétration des poussières dans l'entrefer.



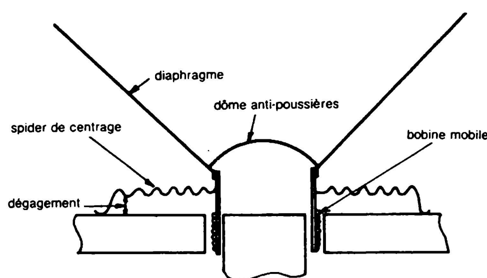
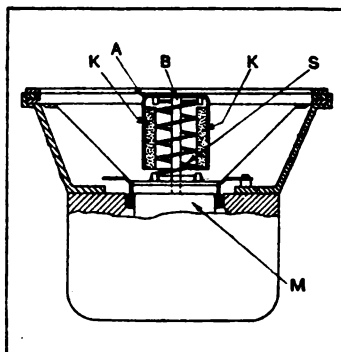



*Fig. 128 : Configuration d'un spider courant, pour lequel il existe de très nombreuses variantes en formes, dimensions, épaisseurs, matériaux, rigidités et qualités. Dans la majorité des cas, il s'agit de tissu pressé et imprégné.*

De nos jours, le système de centrage le plus courant est le spider en couronne, placé autour de la partie supérieure de la bobine mobile. Collé sur la bobine mobile, sa circonférence externe est collée (ou fixée) sur la plaque de champ. La figure 128 montre la vue en coupe d'un spider courant, pour lequel il existe de nombreuses variantes de dimensions et de formes. Dans la plupart des cas, il est réalisé en tissu imprégné moulé, sous forme d'un disque comportant des « corrugations » (ondulations) et un pourtour muni d'un dégagement (pour permettre une oscillation longitudinale sans que cette suspension risque de toucher la plaque de champ, lorsque la bobine mobile s'enfonce dans l'entrefer). La partie plate sert en outre au collage (ou à la fixation). Ce pourtour est en général collé, car les haut-parleurs actuels, suffisamment rigides, ne nécessitent plus de réglages après expédition.

Dans certains cas, le spider, qui peut aussi être réalisé en papier ou même en métal léger (tresse métallique etc.) est non pas collé mais fixé sur un système amovible. Dans ce cas, son pourtour est souvent collé sur une fine couronne métallique perforée, elle même fixée sur la plaque de champ




Spider central à piston (Téléfunken, 1937)

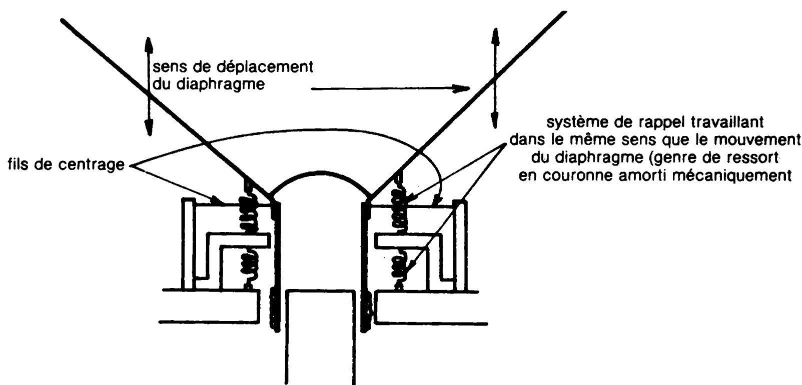



*Fig. 129 : Spider, malheureusement très difficile à réaliser en pratique, travaillant dans le même sens que le mouvement du cône. Ce positionnement et l'emplacement très proche de la bobine mobile devrait théoriquement rendre ce système capable de rappeler très rapidement l'équipage mobile à sa position de repos.*

*Bien que disparu actuellement, l'idée remonte à 1937 et un tel spider avait été utilisé par Téléfunken, mettant en oeuvre un piston central relié à la bobine mobile (brevet n°505964).*

(méthode utilisée par exemple sur la haut-parleur américain Western Electric WE 4151A).

L'avantage d'un tel système est de permettre un recentrage, ou même un démontage éventuel (remplacement rapide de la membrane) si la suspension périphérique est munie d'un système identique.Ce système de fixation, utilisé sur quelques haut-parleurs anglais des années 40-50, était beaucoup plus onéreux qu'un collage, d'où sa disparition.

Le spider en bakélite permettait un centrage rigoureux. Il était par contre le siège d'une résonance parasite marquée. Les suspensions en tissu gaufré, utilisées aujourd'hui, posent beaucoup moins de problèmes. Malheureusement, elles sont sans conteste moins aptes à ramener, immédiatement après le signal, l'équipage mobile, à sa position de repos. Il est important de signaler ce défaut assez courant, auquel l'amortissement électrique de la bobine mobile ne peut suppléer que partiellement.

Le spider est positionné, pour des raisons pratiques, perpendiculairement au sens de déplacement du diaphragme. Il travaille donc plus en flexion qu'en compression ou extension. En fait, il devrait être parallèle à celui-ci (figure 129). En effet, le vecteur de force, sous un angle de 90° est celui qui donne le

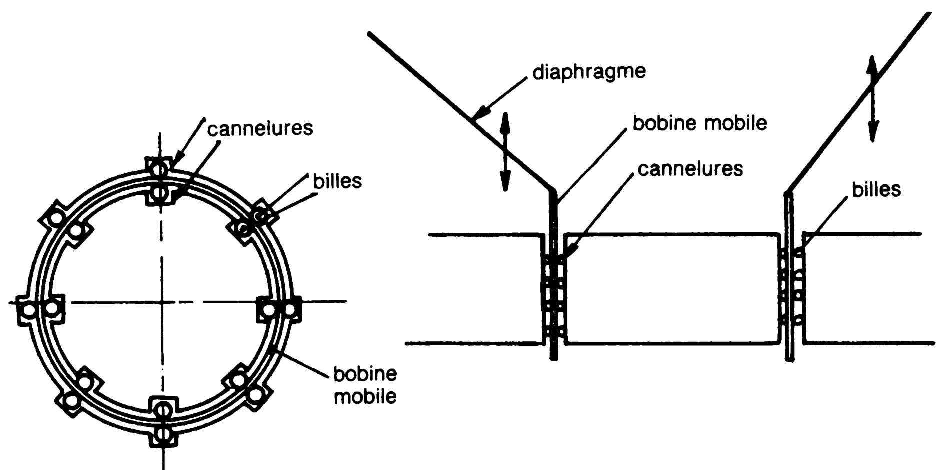



*Fig. 130 : Spider central remplacé par un système de guidage utilisant des billes coulissant dans des cannelures. Bien que totalement absent de risques de flottement latéral, ce système est pratiquement impossible à réaliser et il ne comporte pas de système de rappel. Il existe par ailleurs de nombreuses idées de ce genre, dont certaines sont peut-être applicables en pratique.*

plus mauvais rendement. La solution idéale, malheureusement inappliquable pour des raisons pratiques, serait de faire coulisser la bobine mobile dans un entrefer muni de rainures où seraient placées des billes minuscules, répondant ainsi aux contraintes de mouvement uniforme longitudinalement, d'absence de « flottement » latéral et de compliance mécanique constante sur un déplacement important (figure 130).

Il est possible de remplacer le spider central par une suspension par fils. Dans ce cas un minimum de trois fils est nécessaire. La figure 131 montre la disposition de ces fils. Le centrage est rigoureux, mais n'offre aucune protection contre la poussière.

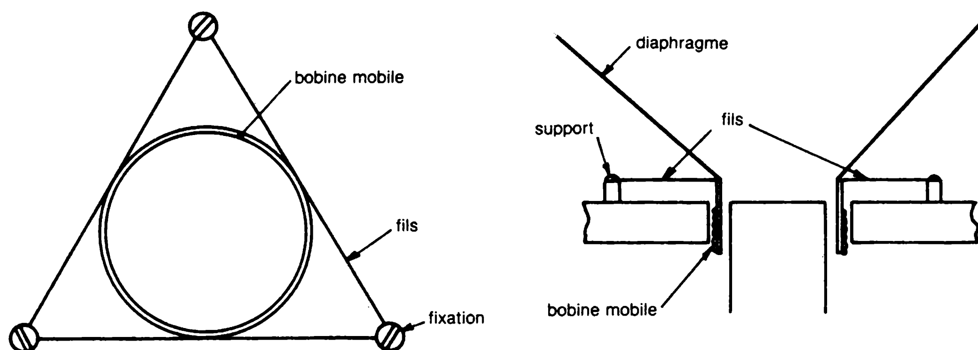



*Fig. 131 : Spider central à fils. Cette idée est ancienne et reste encore appliquée sur certains haut-parleurs. Le centrage est excellent. L'amplitude de déplacement et la linéarité mécanique sont dépendantes de la longueur des fils. Le fil de soie est le plus utilisé. On fait aussi parfois usage de fils recouverts d'absorbants mécaniques (caoutchouc, graisse de silicone etc.). La force de rappel est variable, vu que l'on ne joue que sur la tension mécanique des fils.*

La suspension par fils peut s'utiliser aussi bien sur la périphérie du diaphragme que sur la bobine mobile. Un placement judicieux à 90 ° des fils les uns par rapport aux autres permet un déplacement longitudinal régulier. Cette méthode, appelée « Plunger Fashion » à déjà été brevetée en 1930 sous le n° 313646. La figure 132 montre le positionnement de cette suspension à fils, où deux arrangements sont possibles. Cette méthode a été utilisée sur plusieurs haut-parleurs commercialisés (par exemple Charlin en France ou Muse au Japon).

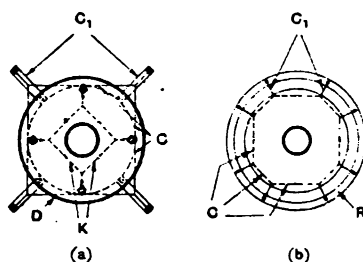



***Fig. 132 : Suspension à fils, de type « Plunger fashion », où les fils sont placés à la fois sur la périphérie du diaphragme et au niveau de la bobine mobile. Le placement des fils à 90° les uns par rapport aux autres (arrangement « a » sur la figure) donne un mouvement bien longitudinal, sans risques d'effet de roulis, Ce système avait été breveté en 1930, sous le n° 313646.***

Pour le haut-parleurs d'aigu, compte tenu du déplacement très réduit du cône, ce spider de centrage est souvent absent. Un profil à génératrice courbée permet, par ailleurs de coller le pourtour du cône, directement sur le chassis ou sur une bande de feutre. Ce moyen avantageux exige un bon centrage, mais améliore le rendement aux fréquences élevées car allégeant l'équipage mobile. Pour les tweeters, les haut-parleurs d'aigus, les deux suspensions peuvent être remplacées par une suspension visqueuse, ou visco-élastique, incluse dans l'entrefer même. Cette solution est parfois utilisée sur les tweeters à dôme (figure 133).

Sur certains haut-parleurs modernes, d'usage haute-fidélité, on revient quelquefois au spider en bakélite, ou a des formes découpées qui rappellent celui-ci. Des

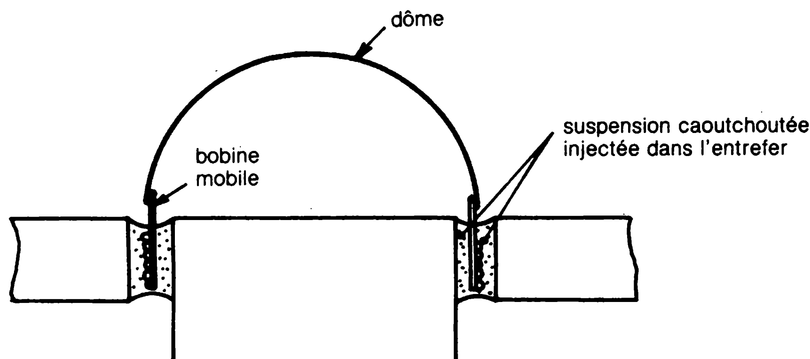



*Fig. 133 : Tweeter à dôme, où la suspension périphérique, le spider sont inexistants. Ils sont remplacés par une suspension en viscoloïde injectée directement à l'intérieur de l'entrefer. Cette solution avait été utilisée sur certains tweeters américains. Parfois, la membrane ne comporant ni spider ni suspension périphérique, possède une génératrice assez courbée et la périphérie est collée soit directement sur le saladier, soit indirectement sur celui-ci, par l'intermédiaire d'une couronne de feutre.*

matériaux différents sont cependant mis en œuvres (métaux légers et souples comme le berryllium par exemple). La firme japonaise Satin avait proposée en 1979 des prototypes de suspension en métal, au profil découpé par procédé photochimique. Selon leurs concepteurs, ils permettaient une très bonne qualité de l'aigu et une excellente réponse transitoires. G.A. Briggs avait d'ailleurs déjà évoqué dans son livre sur les haut-parleurs, les qualités du spider en bakélite.

## Suspension périphérique

La suspension périphérique revet une très grande importance pour le haut-parleur électrodynamique. Cette suspension doit être conforme à des contraintes telles qu'un travail en phase par rapport au mouvement de la membrane, un faible effet de « balancement » (ou roulis) et une grande souplesse. Elle doit également être acoustiquement inerte. La peau de chamois utilisée sur les premiers haut-parleurs, répond à certaines de ces exigences, et possède en plus une assez bonne tenue dans le temps.

Cette suspension est réalisée soit à l'aide d'un gaufrage du bord de la membrane (semblable à celui utilisé sur les spiders en tissu gaufré) soit à l'aide d'une partie rapportée par collage . Cette partie rapportée peut alors être réalisée dans d'autres matériaux que celui de la membrane. On peut utiliser du tissu imprégné et gaufré ou des matières synthétiques (caoutchouc, mousses plastiques etc.). Du point de vue robustesse, la réalisation en une seule pièce de la membrane et de la suspension semble être la plus résistante au vieillissement. Certains caoutchoucs et colles sont cependant excellents et « tiennent bien » pendant une période assez longue. La peau de chamois utilisée autrefois en très faible epaisseur pour les suspensions peut après un certain temps d'usage perdre sa souplesse primitive. Elle peut alors devenir cassante, formant de nombreuses fissures qui vont par la suite entrainer une rupture générale de la suspension.

La mousse plastique (mousse de polyuréthane), solution qui paraît pourtant très élégante, est relativement fragile. Elle est en outre sujette aux défauts de mauvaise étanchéité acoustique et de roulis, pour presque tous les modèles existants (structure des alvéoles), se désagrège au bout de 8 à 10 ans. Des haut-parleurs de ce

genre réalisés vers 1960 sont souvent hors d'usage, alors que des modèles de la même époque, possédant un ensemble suspension périphérique/membrane réalisé en une seule pièce sont presque tous en parfait état de fonctionnement. Cependant, les haut-parleurs les plus résistants à de longues années d'usage sont souvent munis de suspension présentant des défauts plus ou moins graves : résonances parasites, mauvaise linéarité mécanique de déplacement, fréquence de résonance élevée etc.

Ces exigences sont donc très souvent contradictoires et les variantes des brevets d'inventions déposés concernant les suspensions périphériques sont extrêmement nombreuses.

La suspension utilisée sur les haut-parleurs de Rice-Kellogg est représentée sur la figure 134. Elle utilisait une peau de chamois fine (0,8 mm d'épaisseur environ) vieillie et tendue, rapportée par collage sur le pourtour de la membrane de papier.

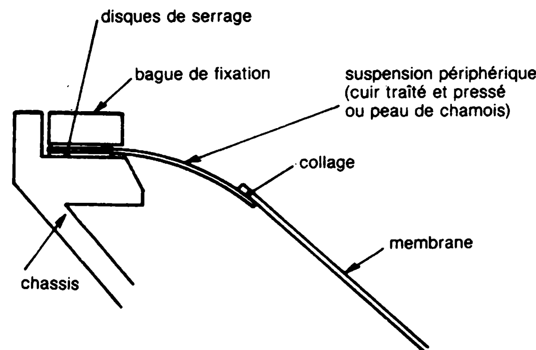



*Fig. 134 : Suspension utilisée sur le haut-parleur de Rice-Kellogg.*

La suspension en papier gaufré, plus économique, s'est répandue depuis. Malgré quelques défauts de résonance parasite et un travail irrégulier en phase, il est possible d'arriver à de bons compromis. La figure 135 montre une vue en coupe d'une telle suspension. Il en existe une infinité de formes dimensions, caractéristiques des corrugations (nombre, hauteur, epaisseur). Sur certains haut-parleurs récents, cette suspension est dite « traitée ». Le papier, à cet endroit, est enduit d'une matière visco-élastique qui à les propriétés de ne pas durcir et de rester collant au toucher. Pour ce traitement on utilise en génaral un élastomère, appélé « viscoloïde » à cause de ses propriétés visqueuses permanentes. Cette matière permet de

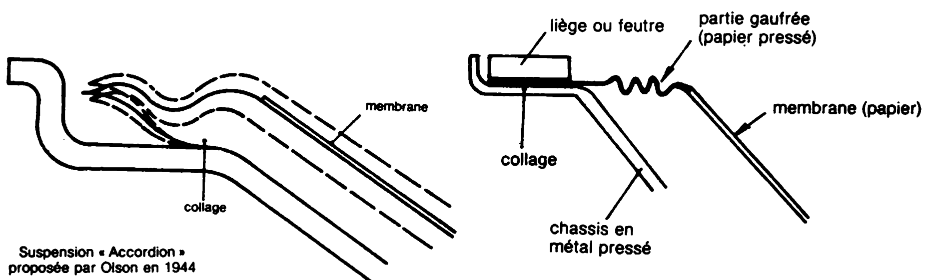



*Fig. 135 : Suspension en papier gaufré, utilisée très couramment. La membrane et la suspension sont moulés d'une seule pièce.*

bien absorber les ondes parasites qui se transmettent dans l'épaisseur de la membrane (donc de ne pas renvoyer celles-ci vers la bobine mobile), de rendre étanche la suspension (certaines ne le sont en effet pas entièrement), mais ce traitement amène d'autres défauts. Parmi ceux-ci, l'addition d'une masse supplémentaire (parfois non négligeable) ou le fait que les poussières se collent très facilement sur cette matière.

Edgar W.Villchur proposa en 1973 un autre type de suspension. Cette suspension en demi-tube (figure 136) fut utilisée avec succès sur un système dit « Acoustic Suspension » de la firme américaine Acoustic Research. Cette suspension, qui permet une plus grande élongation que les suspensions gaufrées, s'est depuis largement répandue. Bien que très intéressante, elle n'est pas exempte de défauts. Généralement réalisée en caoutchouc ou mousse de caoutchouc, elle peut générer, par un travail en opposition de phase ou simplement différent de celui de la membrane, des résonances parasites ou des accidents dans la courbe de réponse amplitude/fréquence.

Cette suspension en demi-tube (« roll-edge » ou « free-edge » outre atlantique) peut exister, suivant les constructeurs en creux ou en relief (c'est à dire concave ou convexe). La solution convexe était celle choisi par E. W.Villchur, car se prêtant bien à une enceinte close de petit volume. La solution concave est actuellement très utilisée.

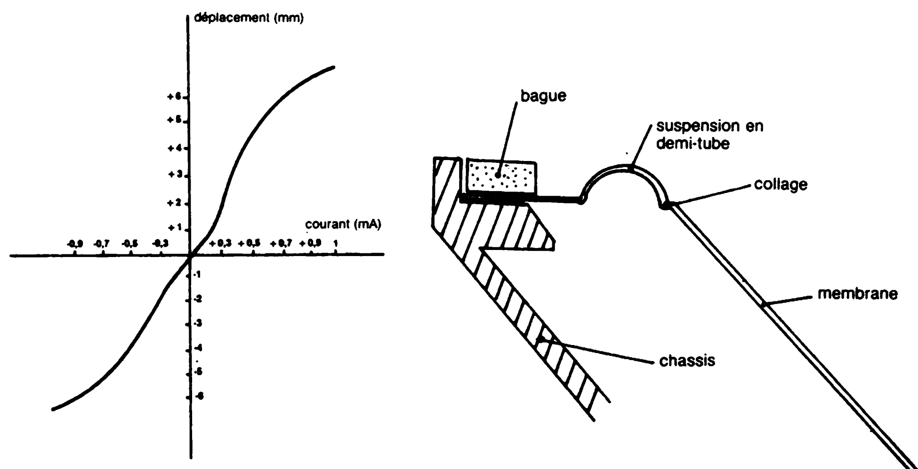



*Fig. 136 : Courbe d'hystérésis de la suspension, où on remarque que les variations de raideur ne sont pas proportionnelles au déplacement. De plus cette caractéristique n'est pas toujours parfaitement symétrique.*

Toutes ces suspensions en « demi-tube » ont le défaut assez grave d'une non linéarité de déplacement. Au fur et à mesure que l'amplitude augmente, la résistance devient plus importante. Le diaphragme se déplace en effet, sur une ligne droite, alors que la suspension, immobilisée d'un coté, se déplace selon un arc de cercle, selon un rayon fonction de sa largeur. Il faut également tenir compte des frottements mécaniques se faisant à l'intérieur de cette suspension. L'ensemble de ce travail est appelé « courbe d'hystérésis de la suspension ». La figure 136 montre l'aspect de celle-ci. On observe une zone linéaire où les variations de courant appliquées à la bobine mobile sont bien proportionnelles au déplacement constaté. De part et d'autre de cette zone, il y a une autre zone de moins en moins linéaire où la suspension devient de plus en plus en raide, s'opposant à la force motrice. Cette

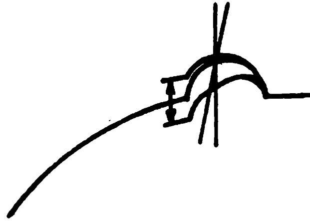


*Fig. 137 : Effet de roulis de la suspension, dû à un glissement transversal de l'endroit de la flexion.*

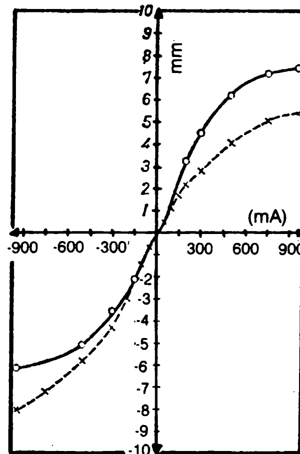



*Fig. 138 : Différences de courbes d'hystérésis mesurées entre une suspension en demi-tube en relief (trait plein) et en creux (pointillé).*

caractéristique prend une allure générale de « S », qui n'est pas toujours symétrique. Cett caractéristique de souplesse (de « compliance », pour reprendre le terme anglais couramment utilisé en français) est une valeur statique, mesurée à l'aide d'un courant continu variable. En fait, et ceci est important à signaler, sur un signal musical ou transitoire, il n'est pas du tout évident que la suspension entière travaille ou que celle-ci travaille de la même façon qu'à des fréquences très basses. Il serait souhaitable de donner une référence en termes de valeurs de souplesse dynamique, et ce à plusieurs fréquences.

Il est à prévoir que plus la fréquence augmente, plus la suspension tend à se « raidir ». Sur un signal audio, la non-linéarité transitoire de la souplesse de la suspension est donc prévisible. Par suspension et sa souplesse, il faut, bien sûr, entendre l'ensemble spider/suspension externe, les deux étant liés.

Pour revenir à la suspension en demi-tube, la courbe d'hystérésis sera différente, selon que la forme soit en relief ou en creux. Lors d'un courant négatif (bobine s'enfoncant dans l'entrefer) la suspension en relief est avantagée. Pour un courant positif (bobine sortant de l'entrefer) la suspension en creux est préférable.

Cette suspension aura tendance à « rouler » sur elle-même (une sorte d'effet de roulis transversal). La figure 137 montre ce défaut qui peut perturber la courbe de réponse. Quant à la figure 138, elle montre les différences, citées plus haut, existant entre une suspension demi-tube en relief ou en creux.

Une idée proposée par la firme japonaise TRIO Kenwood en 1973, consiste à utiliser non plus un demi-tube, mais un profil en « S », afin d'améliorer la caractéristique

d'hystérésis. La figure 139 montre les résultats obtenus avec une telle suspension. La figure 140 permet de voir que l'effet de « roulement » est moins important. Olson avait proposé par ailleurs une suspension dite « accordéon », repliée vers l'intérieur, afin de réduire les flexions du pourtour de la membrane (partie située juste avant la suspension).

Le pli de cette suspension était vertical, et non plus horizontal, comme d'habitude.

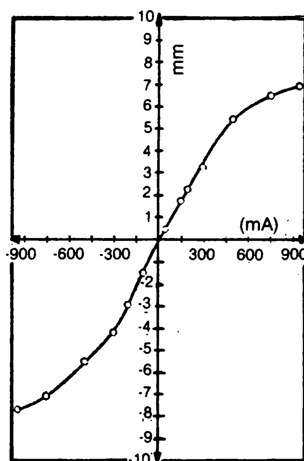



*Fig. 139 : Suspension en forme de « S » utilisée par la firme japonaise Trio en 1973. Elle était destinée à réduire l'effet de roulis de la suspension et à améliorer la caractéristique d'hystérésis.*

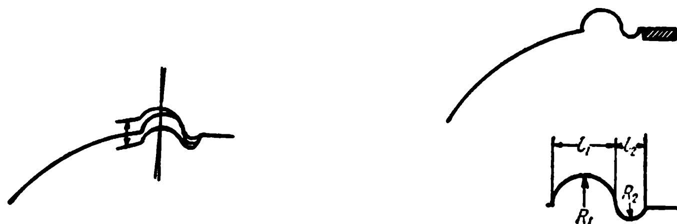


*Fig. 140 : Effet de roulis de la suspension nettement atténué, dont la caractéristique d'hystérésis correspond la fig. 139.*

Cette disposition était avantageuse, car masquant (visuellement et acoustiquement), par son principe même, les plis de la suspension et réduisait les problèmes de rotation de phase à ce niveau.

Cet effet néfaste de roulis, de torsion irrégulière de la suspension, fonction de l'amplitude du déplacement (ou de la fréquence), s'accompagne d'une irrégularité de la courbe de réponse (ondulation, creux, bosse etc.). Ce résultat assez inévitable était très visible sur les premiers haut-parleurs. A certaines fréquences et sous certaines amplitudes de déplacement, le diaphragme et sa suspension périphérique ne vont plus travailler en phase. La surface de la suspension étant naturellement émissive, et non négligeable par rapport à celle du diaphragme, il va s'opérer l'équivalent d'une addition où d'une soustraction soudaine des surfaces rayonnantes.

Des tatonnements, pour déterminer le diamètre optimum d'ouverture du baffle,

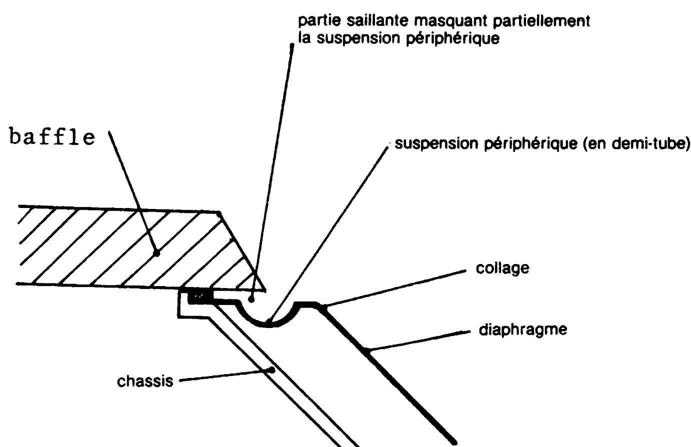



*Fig. 141 : Baffle masquant une partie de la suspension, destiné à réduire l'effet de déphasage acoustique de la suspension périphérique. Bien que simple à appliquer, cette méthode demande une vérification de son efficacité, ceci par la mesure. Ce réglage est parfois délicat.*

guidés par des mesures, permettent une amélioration. Un moyen assez connu peut amenuiser, voire annuler ce défaut : il consiste à placer le haut-parleur derrière le baffle, dont l'ouverture sera découpée selon un diamètre légèrement inférieur à celui du haut-parleur, afin de masquer une partie de la suspension. Bien que délicat, ce réglage du diamètre d'ouverture du baffle est une méthode à la fois simple et économique. Cette idée, qui n'est pas nouvelle, se trouve réappliquée sur de récentes enceines acoustiques de haute fidélité. Cependant, la mesure est d'une grande aide pour cette optimalisation. La figure 141 montre la façon généralement utilisée pour masquer partiellement la suspension.

Toujours pour améliorer la caractéristique d'hystérésis, d'autres idées vont s'ajouter à celles portant sur les formes des suspensions acoustiques. Certaines de

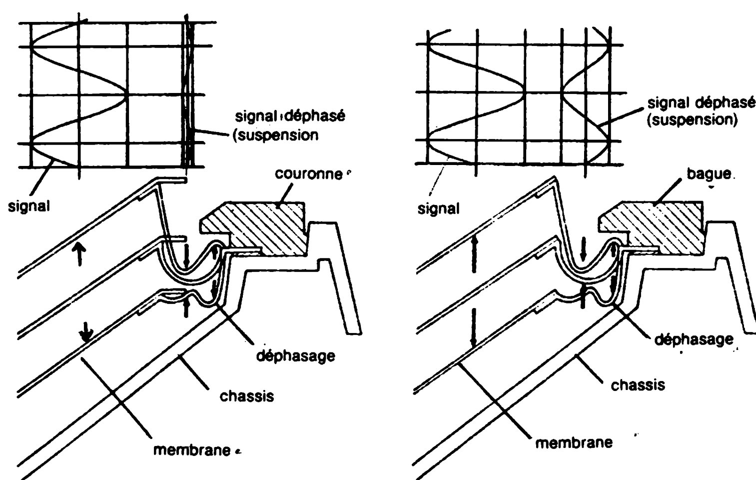



*Fig. 142 : Application pratique d'une suspension périphérique à « blindage acoustique », baptisée « Shielded suspension », par son constructeur japonais.*

ces idées, anciennes, vont bénéficier d'une technologie nouvelle. La figure 142 montre une de ces idées, récemment reprise par un constructeur japonais. Cette suspension, baptisée « Shielded Suspension » (c'est à dire suspension acoustiquement blindée), consiste à prolonger le diaphragme, normalement collé sur la suspension périphérique, de manière à ce que le mécanisme ajouté masque une partie de cette suspension. La périphérie du chassis comporte, d'autre part, une couronne débordant du côté intérieur, cachant ainsi l'autre partie de la suspension. Sous de faibles amplitudes, la suspension est ainsi dissimulée. Cette idée semble basée sur le principe « accordéon » d'Olson (figure 135). Ici encore, cette technique ne peut être utilisée que guidée par des mesures précises. En effet, ce blindage acoustique provoque aussi un effet de cavité au dessus de la suspension, effet dont il faut tenir compte. Bien conçu, il peut par contre apporter de notables améliorations (cas de la figure 143 ou l'amélioration est nettement visible sur la courbe de réponse amplitude/fréquence).

La suspension acoustique non étanche (mousse synthétique par exemple) est parfois utilisée sur les tweeters, étant donné l'amplitude de déplacement assez limitée et la faible longueur d'onde. Sur les haut-parleurs large bande, elle est par contre assez désavantageuse en raison des fuites acoustiques (court circuit acoustique aux fréquences basses, difficultés de réglage en enceinte close ou accordée).

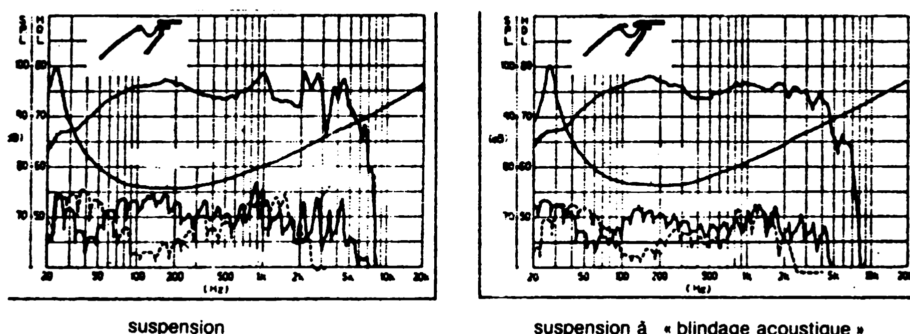



*Fig. 143 : Amélioration apportée par une suspension périphérique « blindée » similaire à celle de la fig. 142.*

Elle s'accompagne, en général, d'une mauvaise tenue dans le temps.

Comme indiqué précédemment, le traitement de la suspension par un produit « viscoloïde » peut également donner de très bons résultats : il rend acoustiquement plus inerte le pourtour de la membrane et réduit, grâce à son effet absorbant, le «retour » des vibrations sonores vers le centre de la membrane. Sans ce traitement, les vibrations émises par la bobine mobile, traversant la membrane jusqu'à la suspension périphérique, sont « réfléchies » par la suspension et retournent vers leur point d'origine. La figure 144 représente la réponse d'un haut-parleur à suspension « gaufrée », avant et après traitement. L'amélioration est due en partie à l'augmentation de la masse au niveau de la suspension, alliée aux propriétés d'absorbtion de ce traitement.

Sur de vieux haut-parleurs, la suspension périphérique est parfois recouverte d'une fine bande de feutre ou de tissu. Dans son livre sur les haut-parleurs, Olson parlait aussi d'un amortissement à l'aide d'une couronne de caoutchouc mousse, collée sur une des corrugations de la suspension (figure 145). Cette méthode n'est pratiquement plus utilisée de nos jours.

Dans certains cas on peut se passer de suspension périphérique. Ceci est inté-

ressant lorsqu'on désire obtenir une grande élongation (haut-parleur de grave) ou une fréquence de résonance très basse malgré un diamètre limité . Afin d'être bien guidée dans l'entrefer, sans toucher les pièces polaires, la bobine, d'une configuration longue, est maintenue aux deux extrémités par deux suspensions (spiders). Ce montage est nécessaire pour obtenir un mouvement longitudinal sans trop d'effet de roulis.

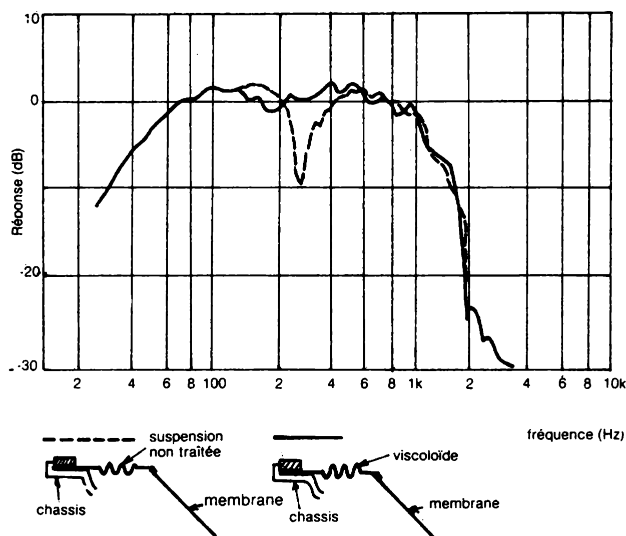



*Fig. 144 : Effet du traitement de la suspension périphérique à l'aide de « viscoloïde ». Noter que le résultat n'est pas obligatoirement meilleur et que de faibles variations de la masse de ce traitement peuvent apporter des dispersions dans le résultat obtenu. Ce traitement est très utilisé en pratique. Il se fait souvent dans le papier de la membrane même (membranes faites d'une seule pièce, y compris la suspension) ou encore dans du tissu pressé.*

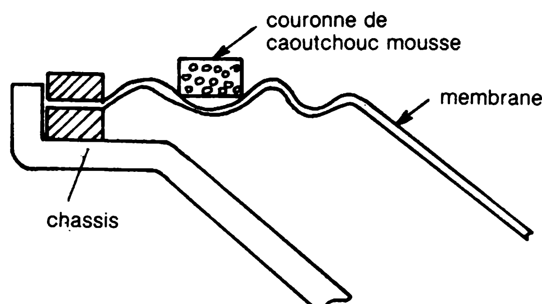



*Fig. 145 : Amortissement de la suspension réduisant l'effet de déphasage. (D'après Olson).*

Cette technologie apporte cependant un inconvénient. Une légère fuite acoustique est crée sur le pourtour de la membrane, à l'emplacement de la suspension inexistante. Pour remédier à ce défaut, on peut réduire l'espace entre le chassis et le bord de la membrane. En munissant le bord de la membrane d'une partie plus rigide (moulage, couronne légère mais rigide), on arrivera à un résultat similaire.

On peut encore choisir une solution intermédiaire utilisant des sortes de « bras »

(en quantité et de largeur variables) réalisés en bakélite ou avec d'autres matériaux. Ce genre de solution avait été retenu sur un haut-parleur anglais qui connut le succès pendant plusieurs années : le modèle Axiom 80 de la firme Goodmans. Cette solution a également été utilisée pour quelques haut-parleurs de médium japonais (Pioneer par exemple).

Il a été dit plus haut que pour certains tweeters à dôme on pouvait se passer de suspensions. Dans ce cas, le pourtour du diaphragme, de forme courbe, est collé, soit directement sur le chassis, soit une couronne de feutre (ou autres matériaux absorbants).

A propos des tweeters et de la raideur des suspensions, si l'on désire obtenir une fréquence de résonance aiguë élevée, il faudra faire appel à un cône de masse faible, soit à une suspension relativement rigide. Si le papier du cône est trop mince, il se produit une distorsion par manque de rigidité. Si la masse est trop importante, l'efficacité du haut-parleur baisse. En considérant sh comme exprimant la valeur de la raideur d'une suspension, on peut écrire :

$$sh = \pi \, Et_C \left[ \frac{\cos^{2\theta}}{\sin^{\theta}} \right]$$

où 2 $\theta$ est l'ouverture du cône, tc son épaisseur en cm et E la rigidité du papier utilisé (module d'Young en dyne/cm²).

L'angle d'ouverture étant lié au résultat dans l'aigu, il n'est pas possible (où très difficile), d'obtenir une bande passante supérieure à 10 où 12 kHz avec des diamètres de haut-parleurs supérieurs à 25 cm. La figure 146 représente une courbe tirée de la formule indiquée ci-dessus.

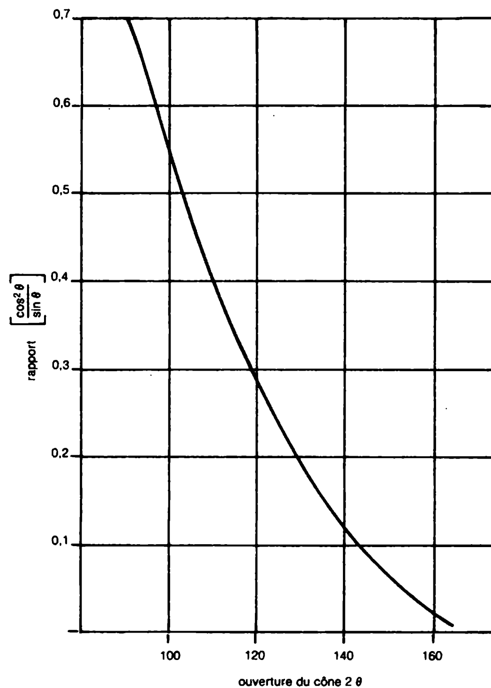



*Fig. 146 : Rapport* $\frac{\cos^2 \theta}{\sin \theta}$ */angle d'ouverture du cône.*

## Le diaphragme

Il est facile d'imaginer que c'est un paramètre important. Il influencera autant les mesures que les résultats d'écoute. Le diamètre du diaphragme, sa masse, sa raideur vont déterminer sa fréquence de résonance. La forme de ce diaphragme, sa texture vont également avoir une incidence directe sur les caractéristiques de directivité, réponse transitoire et bande passante. Il est difficile de trouver un très bon compromis. Une membrane légère, nécessaire pour obtenir une bonne réponse transitoire, est souvent peu rigide. Si l'on désire obtenir une fréquence très basse, on doit faire appel soit à un diaphragme lourd, néfaste pour la réponse transitoire, soit à un diaphragme léger, qui nécessite une suspension périphérique et un spider trop souples pour donner un bon centrage et une force de rappel suffisante. Le cône trop léger a, dans presque tous les cas, le gros désavantage de n'être pas assez rigide d'un point de vue dynamique. A partir d'une certaine fréquence, il se produit une « cassure ».

Cet effet de « cassure » est dû à un fléchissement brutal de la membrane à partir d'une certaine fréquence. Il a pour effet, pour les fréquences les plus élevées, de ne mettre en mouvement que la masse centrale du dipahragme. Cet « allongement » brutal de la masse en mouvement, provoque une remontée brutale de courbe de réponse aux fréquences où elle se manifeste. Elle est suivie d'une chute brutale de niveau (surface rayonnante brutalement réduite) et de nombreux accidents (réflexions parasites à l'intérieur de la membrane, ondes stationnaires, etc.). Cet

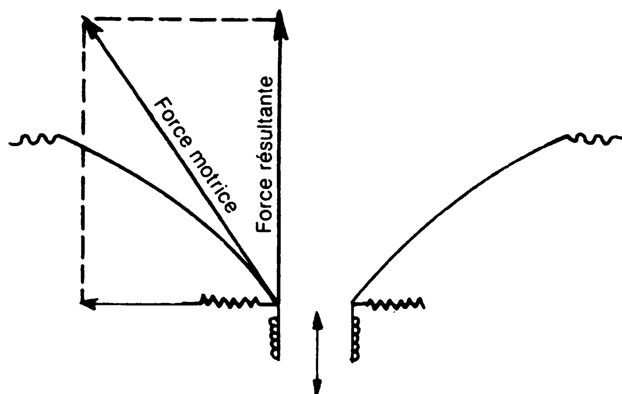



*Fig. 147 : Vecteur de force sur un haut-parleur de type Rice- Kellogg. Il met en évidence le compromis caractéristique de rigidité du diaphragme vis à vis de la directivité.*

accident, dû à un diaphragme trop léger et insuffisamment rigide aux fréquences élevées, peut facilement être mis en évidence par diverses méthodes. Ce défaut est dû aux principes mêmes du haut-parleur de Rice Kellogg (une grande surface rayonnante n'est mue que par une petite surface motrice),où la rigidité du diaphragme à une grande influence.

La texture du diaphragme, sa forme sont prépondérantes pour les résultats tant objectifs que subjectifs. Les premiers haut-parleurs utilisaient aussi bien pour des raisons économiques que pratiques, des membranes de forme coniques. Il était fait usage d'une membrane, non pas moulée comme de nos jours, mais découpée dans une feuille plane et collée longitudinalement. L'angle d'ouverture de ce diaphragme joue aussi un rôle prépondérant pour les caractéristiques de directivité, surtout aux

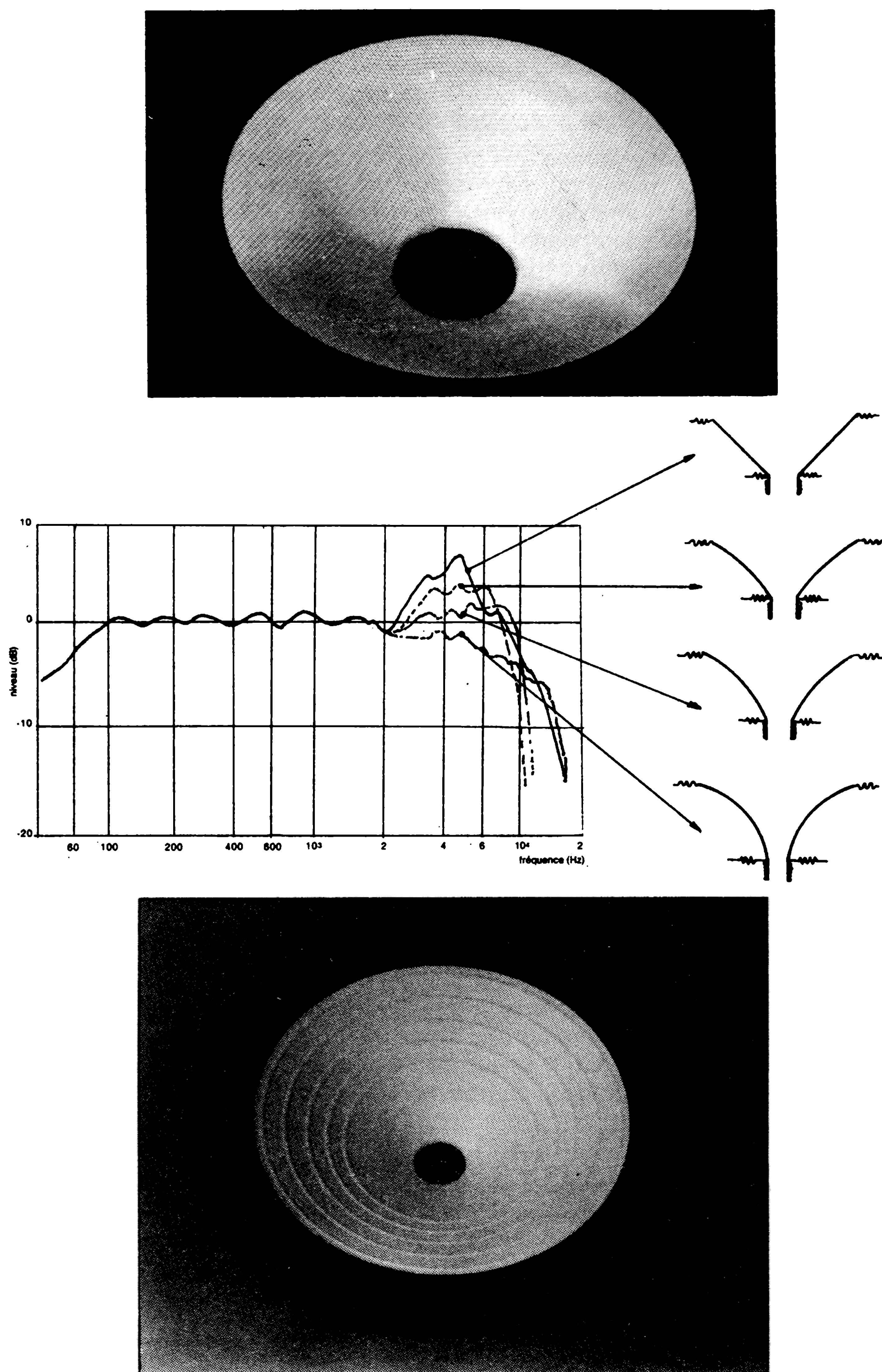



*Fig. 148 : Aspect général de diverses courbes de réponse obtenues à partir de diaphragmes de génératrices différentes : droite, légèrement curviligne, exponentielle, fortement curviligne. Remarquer l'effet sur la réponse aux fréquences élevées.*

fréquences élevées. A ce niveau, il faut faire un autre compromis : un angle très fermé désavantage la directivité mais offre une meilleure « prise » mécanique de la bobine mobile (force motrice) sur le diaphragme. Le compromis est expliqué sur le schéma des vecteurs de force (figure 147). Un angle d'ouverture très large est défavorable malgré une directivité moins prononcée.

Pour les zones de la membrane très proches de la bobine mobile, la forme, la rigidité, l'épaisseur et la masse du diaphragme influencent énormement le résultat d'écoute ainsi que la courbe de réponse aux fréquences élevées.

De nombreux facteurs interviennent sur la linéarité de la courbe de réponse aux fréquences élevées; la courbure de la membrane est un de ces moyens. Sur la figure 148 on peut voir l'aspect des courbes avec plusieurs formes de génératrices, depuis le diaphragme cônique jusqu'aux diaphragmes à forte courbure. Entre ces deux extrêmes, il est possible de trouver une forme qui optimise la courbe de réponse. Toutefois, un moulage étant nécessaire, l'outillage assez onéreux limitera le nombre des essais possibles.

Le diaphragme peut être réalisé dans de nombreux matériaux. Parmi ceux-ci, le papier (pulpe de cellulose) est le plus utilisé. La technologie de fabrication, le type et la longueur des fibres, la méthode de pressage, le type de colle où d'agglomérant sont autant de facteurs qui auront leur importance pour le résultat final : Il existe en plus, des possibilités de réglage de l'épaisseur de la membrane qui peut ne pas être constante tout au long de la génératrice. On peut faire appel également à une sorte d'amalgame de matériaux différents, comme par exemple un papier dur et léger pour la partie centrale et un papier plus mou pour la périphérie.

Le papier peut également être imprégné, d'une façon partielle ou totale, sur une où deux faces.

D'une manière générale on peut prétendre qu'une membrane à la fois dure et légère n'est rigide que pour une bande de fréquence limitée dans l'aigu. Au delà, on note une résonance suivie d'une « cassure » du travail en piston (nombreux accidents sur la courbe de réponse) et la formation d'ondes stationnaires à l'intérieur du matériau.

## Les corrugations

C'est également un moyen de contrôler le fractionnement de la membrane. Le principe est similaire à celui d'un diaphragme à génératrice rectiligne. Dans le cas d'un diaphragme à moyenne ou forte courbure, la variation du vecteur de force est telle que la périphérie de la membrane à partir d'une certaine fréquence, n'entre pratiquement pas en vibration, à cause de sa courbure et de sa masse. On peut ainsi expliquer l'amélioration de la courbe de réponse aux fréqueces élevées par un

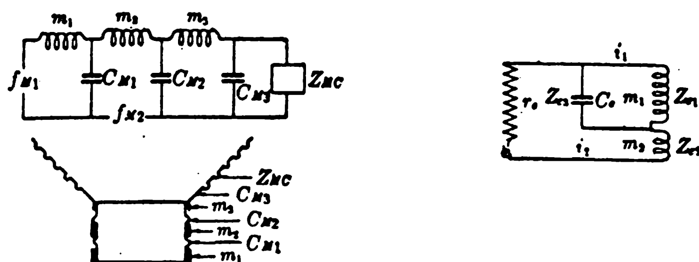


*Fig. 149 : Equivalent électrique d'un haut-parleur comportant une membrane munie de corrugations.*

allègement de la masse effective en mouvement. De même, un traitement et un alourdissement de la périphérie de la membrane apporte le même effet (que l'on peut assimiler à un blocage de la membrane par effet de masse).

Il existe un autre moyen pour contrôler les déformations parasites de la membrane. Il suffit d'introduire le long de la génératrice de la membrane plusieurs suspensions, découplages mécaniques couramment appelés « corrugations ». Elles permettent d'abaisser la valeur de la masse en mouvement au fur et à mesure que la fréquence augmente, afin d'obtenir une bonne linéarité et d'étendre la bande passante dans l'aigu. La figure 149 montre l'aspect schématique de ces corrugations ainsi que leur équivalent électrique. Les corrugations existent sous des formes trop diverses pour pouvoir être passées en revue. Trop nombreuses ou trop souples, elles peuvent avoir le défaut de procurer à l'ensemble une mauvaise réponse transitoire.

Cette mauvaise réponse transitoire s'explique par le découplage mécanique, accompagné d'un retard temporel dans la transmission du signal à travers la membrane. Certains constructeurs préferent une membrane sans corrugations mais à génératrice courbée, qui donne un fractionnement plus progressif.

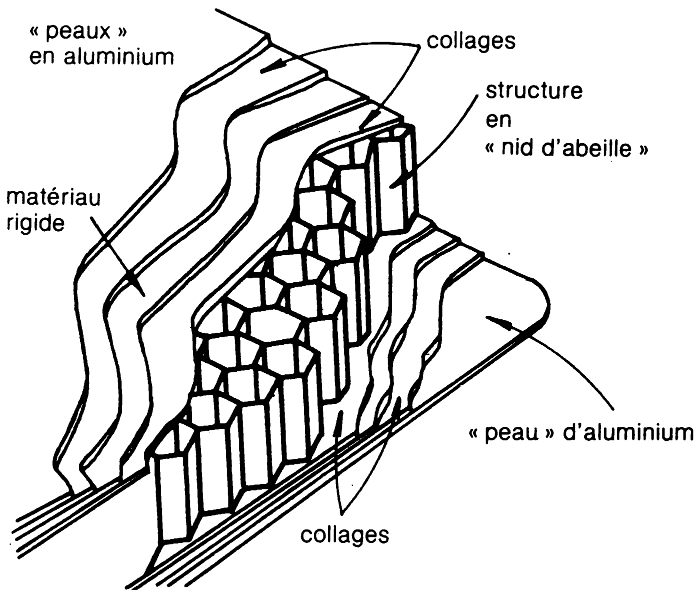





*Fig. 149 bis : Aspect et courbe de réponse typique d'un haut-parleur à membrane plane du genre « nid d'abeille ». Remarquer l'excellente linéarité dans une grande partie de la courbe (travail en piston) suivie d'une résonance élevée assez caractéristique sur ces transducteurs et d'une chute de niveau irrégulière (cassure dynamique de la membrane).*

Pour les haut-parleurs courants, les corrugations sont utilisées dans presque tous les cas. L'ajustement de la souplesse de celles-ci (largeur, profondeur, épaisseur) est assez délicat.

Dans le chapitre sur les mesures, il sera encore question de ce fractionnement. Il serait vain , en effet, de prétendre pouvoir faire fonctionner les membranes en piston à toutes les fréquences. Les corrugations sont en général circulaires. Il existe quelques exceptions de formes plus variées (spirales, ellipses, placement dans le sens vertical).

Toujours à propos des corrugations, celles-ci ne doivent pas être confondues avec d'autre artifices qui visent eux, à obtenir un raidissement et une meilleure transmission des ondes à travers la membrane. Le but des corrugations est de découpler mécaniquement une partie de la membrane par rapport à une autre, et non d'améliorer la transmission. Les systèmes de raidissement sont plus rarement employés. On ne les trouve que sur quelques haut-parleurs récents (Tannoy GB, Trio, Sharp Japon).

Cette rigidité n'est cependant pas toujours constante lors des variations de fréquences et, au delà d'une certaine limite, se produit la « cassure » habituelle, au delà de laquelle la bobine mobile devient incapable de contrôler le mouvement de la membrane.

Au sujet de la membrane et de ses nouvelles technologies, on parle beaucoup aujourd'hui des nouvelles structures de membranes planes ou côniques utilisant une structure en « nid d'abeille » recouverte d'une ou deux peaux en surface. Ce nid d'abeille, qui allie une grande rigidité à une remarquable légèreté, est généralement réalisé à partir de métaux légers (aluminium etc.). Il est couramment utilisé en aéronautique.

Cette technique nécessite des collages, aussi la masse de colle utilisée va-t-elle influencer les résultats obtenus. Il faut aussi penser que ces matériaux disparates réunis, possèdent des masses spécifiques, des vitesses de propagation des vibrations parfois très différentes. A part une résonance caractéristique dans l'aigu, ces structures ont des courbes de réponse en générale excellentes. La résonance aiguë est suivie d'une cassure brutale que l'on peut assimiler à celle de la figure 149 bis.

Le haut-parleur Rice-Kellogg comporte de très nombreuses variantes de construction. Il en sera question plus loin et on pourra voir un aspect général de ces possibilités.

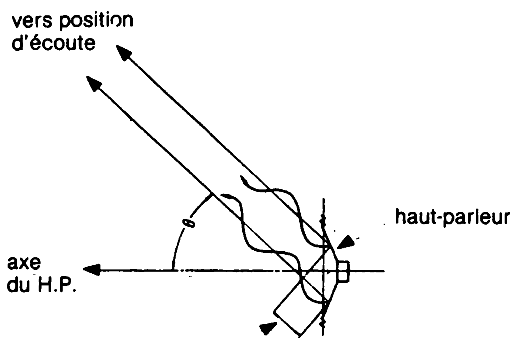



*Fig. 150 : Phénomène de déphasage connu, provoqué par des signaux émis en même temps, mais parcourant des distances différentes jusqu'au point d'écoute. Ce phénomène se produit aussi entre différents transducteurs montés sur une enceinte. Il a été un sujet particulièrement discuté ces récentes années.*

## Courbe de réponse en dehors de l'axe

Il ne sera ici question que de l'influence du profil du transducteur sur la directivité.

En dehors de l'axe, la forme et l'angle d'ouverture du diaphragme vont provoquer un découplage. Ce problème est expliqué sur la figure 150. Il s'ensuit un effet d'annulation du niveau acoustique suivant la fréquence et l'angle d'écoute. Ceci dépendra du rapport rayon du haut-parleur/longueur d'onde reproduite. La figure 151 donne un exemple de courbe de réponse en fonction de ce rapport.

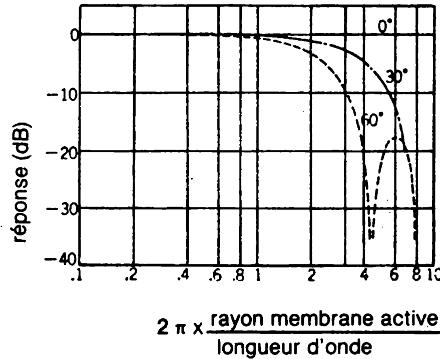



*Fig. 151 : Courbe de réponse obtenue à partir d'une certaine distance de la source sonore, mettant en évidence l'accident de phase. Souvent cet accident est prononcé lors de la mesure mais moins sensible à l'écoute. Lors de la mesure, la position du microphone influence beaucoup le résultat.*

Pour les dômes (haut-parleurs d'aigus de médium) l'angle d'ouverture va jouer le même rôle. La figure 152 indique les caractéristiques de différents dômes par rapport à une membrane plane et circulaire. Sur cette figure est indiqué le niveau de radiation moyen.

Enfin, sur la figure 152, le graphe montre la fréquence limite, reproductible sans ce déphasage, pour différents diamètres de haut-parleurs. Il sera encore fait état de cette caractéristique de directivité dans le chapitre sur les mesures.

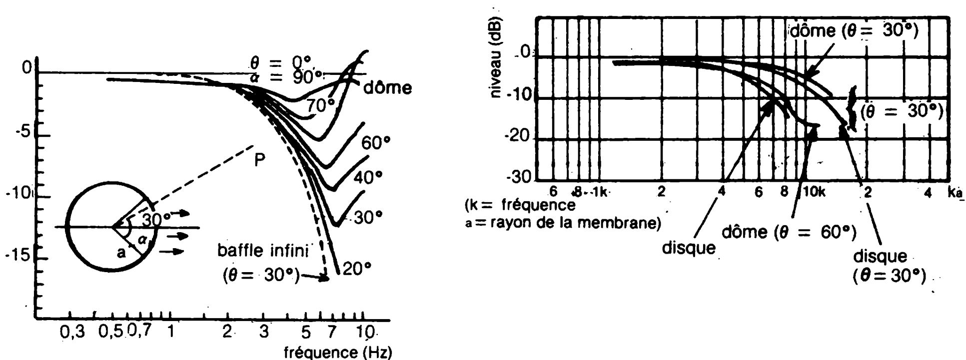



*Fig. 152 : Graphe concernant la fréquence limite pouvant être reproduite sans risques de déphasage, pour des disques plans ou des dômes. La réponse en niveau est donnée également pour différents angles d'écoute.*

## Caractéristique d'impédance

La courbe d'impédance d'une bobine doit normalement monter lorsque la fréquence augmente (figure 153). Dans le cas du haut-parleur Rice-Kellogg, la masse en mouvement, le cœfficient de self-induction de la bobine ainsi que des phénomènes magnétiques vont donner à ce transducteur une courbe d'impédance similaire à celle de la figure 154

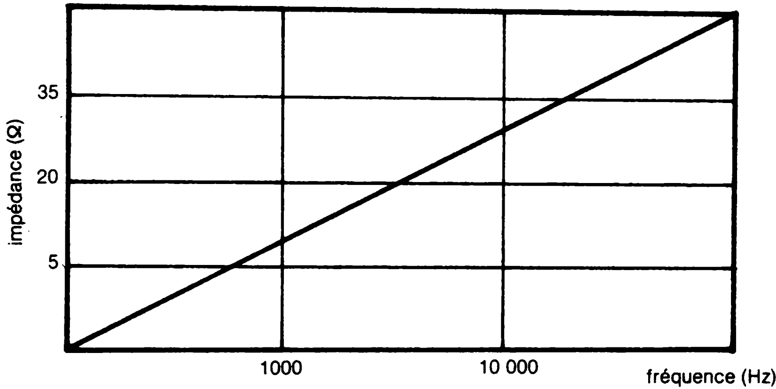



*Fig. 153 : Courbe d'impédance d'un haut-parleur électrodynamique, avec bobine bloquée mécaniquement. C'est la caractéristique d'une self. Cependant, les autres petits phénomènes parasites sont exclus de la courbe (capacité parasite, résistance parasite etc...).*

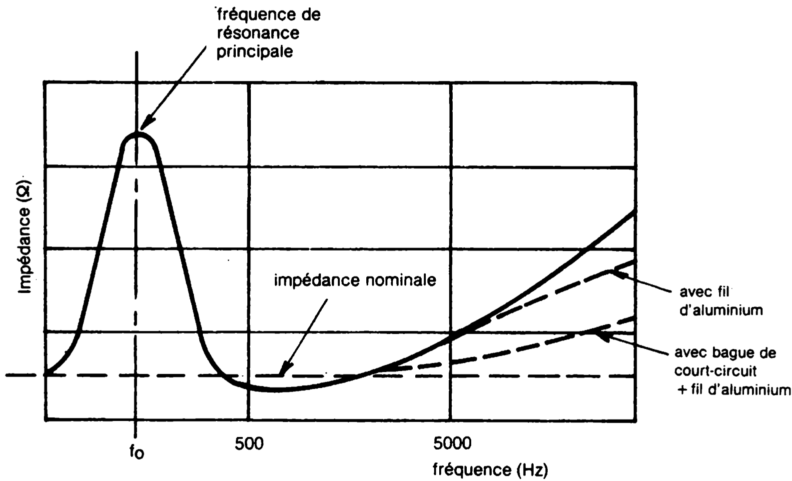



*Fig. 154 : Courbe d'impédance d'un haut-parleur électrodynamique courant. Aux fréquences élevées, noter l'effet sur l'impédance d'artifices connus comme le fil d'aluminium ou la bague de court-circuit.*

Au fréquence basses, on note une résonance tout à fait caractéristique de ce genre de haut-parleur. Elle va dépendre aussi du milieu dans lequel va travailler le transducteur : baffle plan, enceinte close, etc.

Pusieurs moyens permettent de linéariser la courbe d'impédance aux fréquences élevées. Parmi ceux-ci, citons la bague dite de « court-circuit », décrite par Olson.

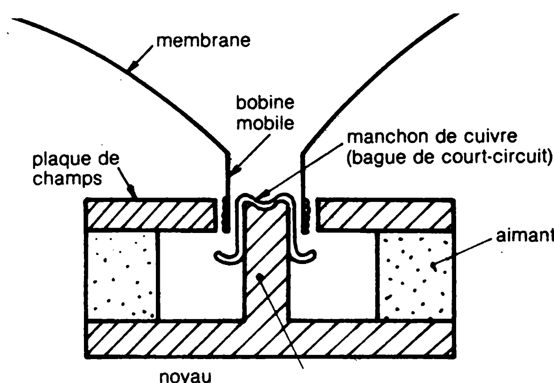



*Fig. 155 : Bague dite de « court-circuit », réduisant l'augmentation de l'impédance aux fréquences élevées. Elle est généralement réalisée en cuivre ou dans quelques matériaux magnétiques. Elle peut également être destinée à réduire le taux de distorsion, par amélioration de la linéarité du champ dans l'entrefer (cas des haut-parleurs Sony, série ULM, réalisés en 1970).*

Cette bague fut d'ailleurs utilisée il y a déjà fort longtemps par des firmes comme Philips (Hollande) ou Sony (Japon). La figure 155 montre un exemple de cet artifice intéressant.

### Variantes du haut-parleur de Rice Kellogg

Elles sont fort nombreuses. Les modifications ont porté sur de très nombreux points : forme de la membrane, suspension, circuit magnétique, matériaux. La figure 156 montre quelques-unes de ces variantes, en fait bien plus nombreuses dans la réalité.

Quelques variantes de forme curieuse ont été appliquées par certains constructeurs français, anglais, japonais ou américains. Au Japon, par exemple, Hitachi avait présenté en 1970 un haut-parleur de grave à grande bobine mobile, de forme située à mi-chemin entre le dôme et le cône. Aux U.S.A., la firme Ohm utilisait un cône d'ouverture relativement fermée, disposé verticalement, coté étroit vers le haut (relié au moteur). La partie interne du cône communiquait avec l'intérieur de l'enceinte et les sons étaient ainsi émis par la périphérie de ce cône. Pour les tweeters, une autre idée américaine consistait à disposer verticalement une petite membrane cônique (sans aucune suspension périphérique), réalisée en métal léger, dont la partie concave était remplie d'absorbant.

En France, au cours des années 60, la firme Gégo avait commercialisé avec succès ses haut-parleurs « Soucoupe », à circuit magnétique inversé, utilisant une suspension périphérique maintenue par trois branches reliées au moteur central.

En Suisse, on trouvait aussi, vers 1968, des prototypes de haut-parleurs baptisés « Péridyne », haut-parleurs large bande à dôme rigide (diamètre 10 à 12 cm) comportant une bobine mobile placée sur la périphérie et un dégagement total de la partie arrière de la membrane grâce à l'utilisation d'un aimant en couronne. Le spider était remplacé par quatre fils placés entre le chassis et le centre de la membrane.

L'évolution d'un haut-parleur, tel que celui de Rice Kellogg, est toujours intéressante à connaitre. Dans les pages qui suivent figurent des photos, reproductions de publicités anciennes de plusieurs haut-parleurs d'un intérêt particulier. Certains de ceux-ci ont connu leurs années de gloire et quelques-uns possédaient des performances remarquables.

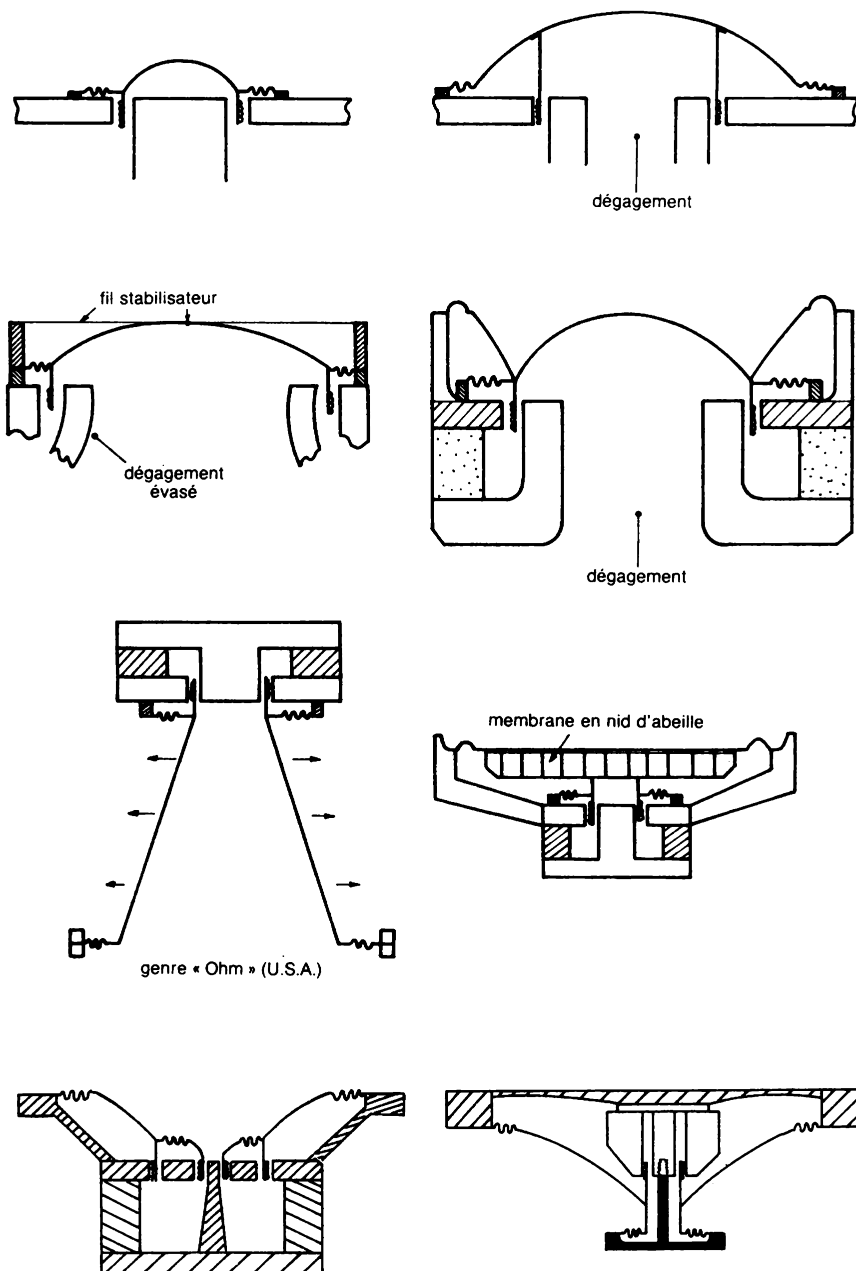
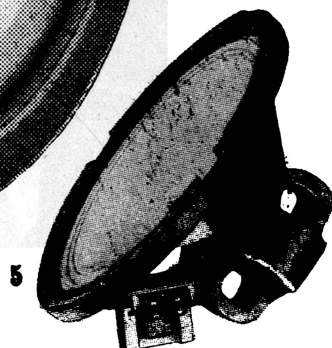


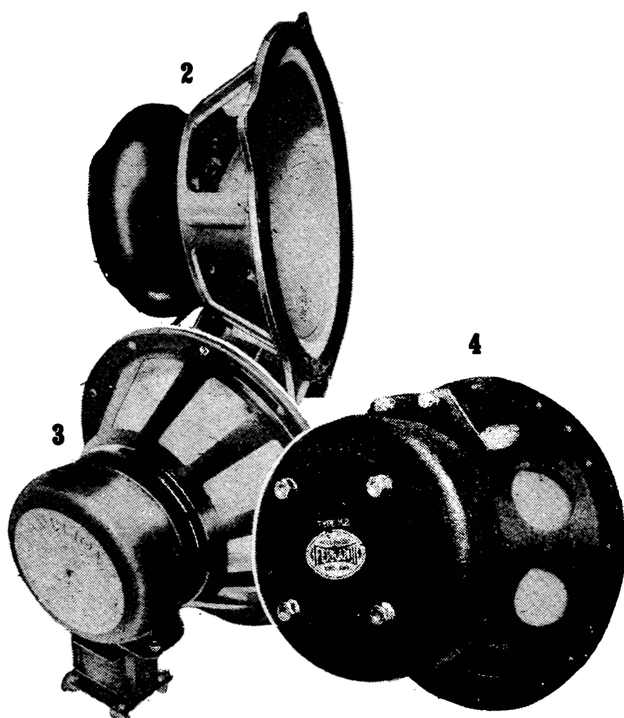

*Fig. 156 : Coupe schématique de quelques haut-parleurs électrodynamiques réalisés selon le principe de Rice et Kellogg. Ces variantes sont en fait bien plus nombreuses.*

TYPE M1*
DYNAMIC SPEAKER
FERRANTI
HOLLINWOOD
ENGLAND

1



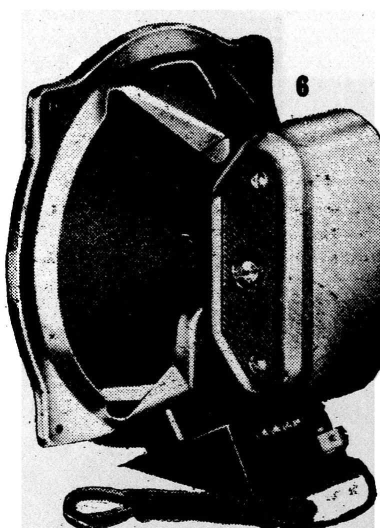
5



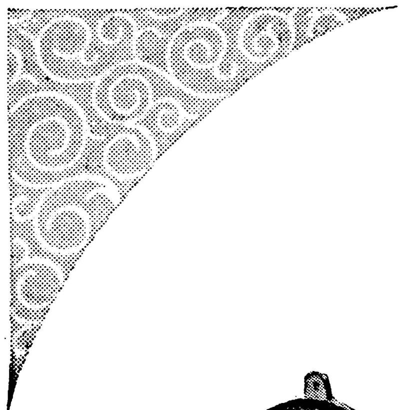

2

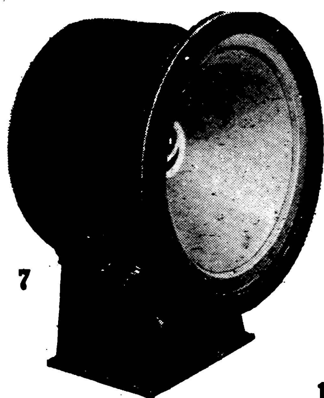
3

4

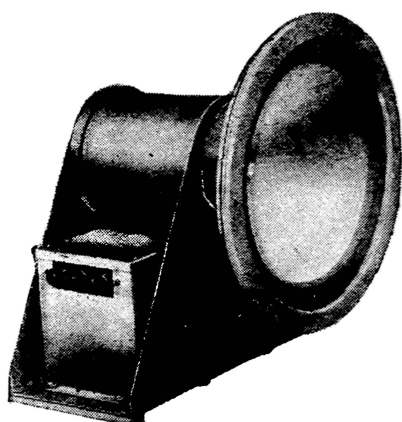


6

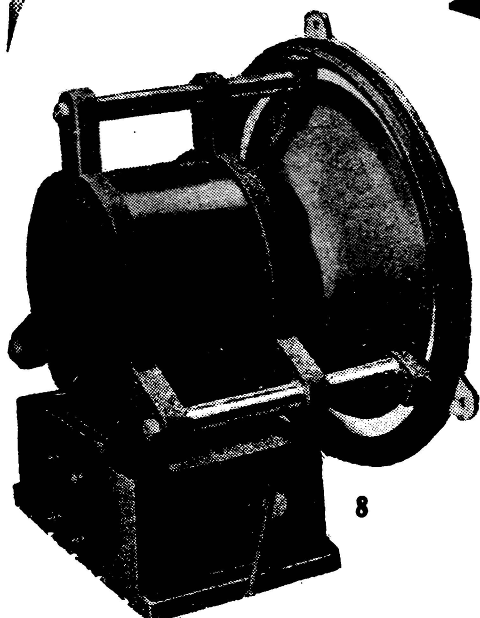




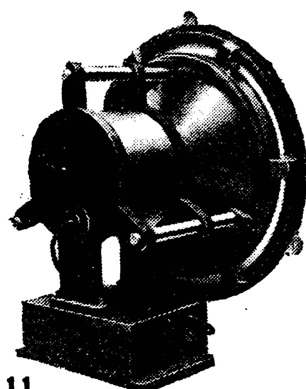
7



10

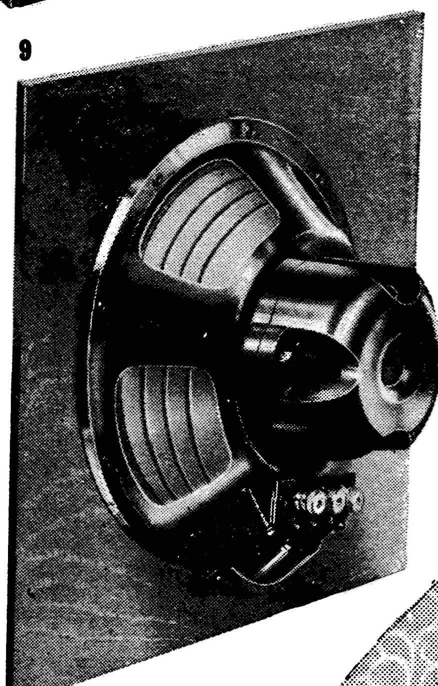


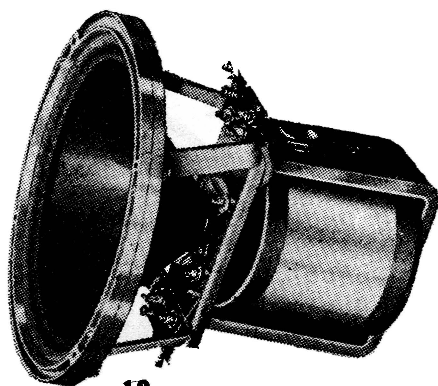
8



11

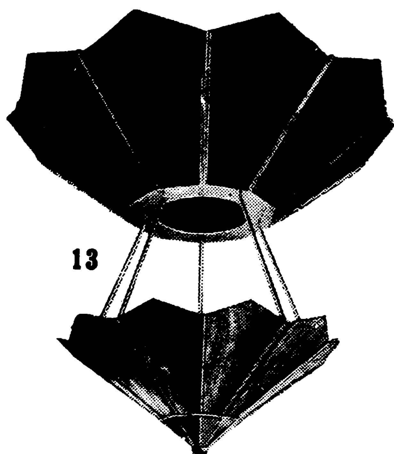
9



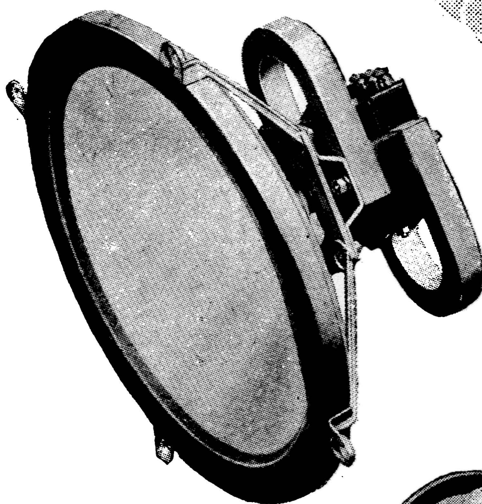


12

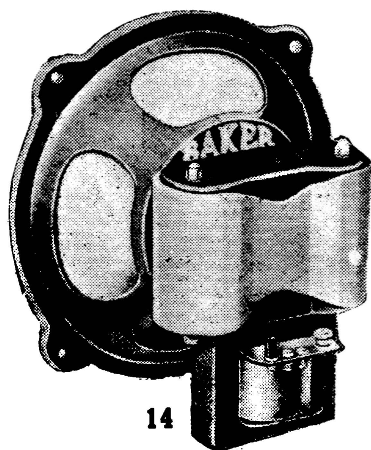
# LO
# SPEA



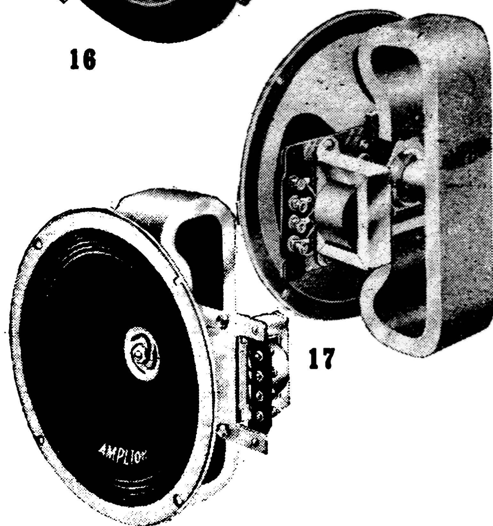
13



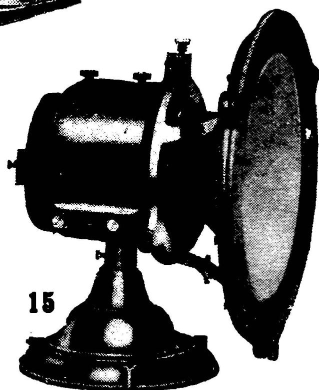
16




14

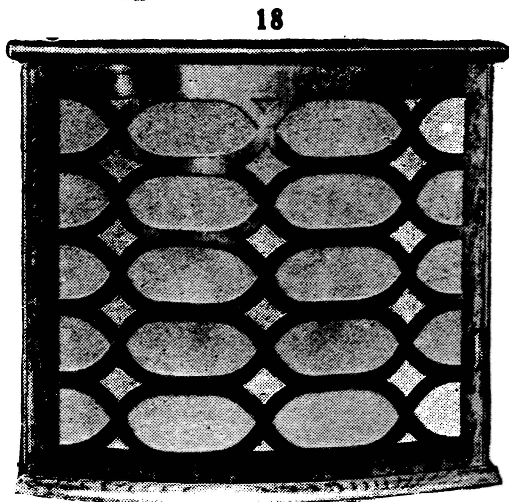


17

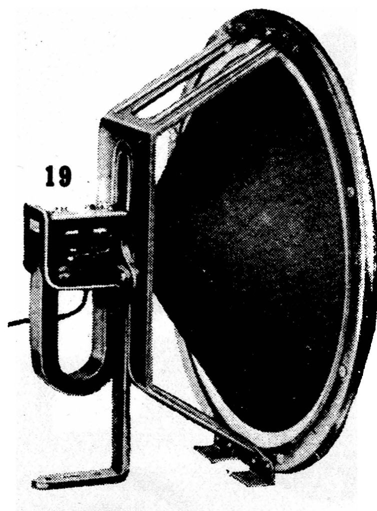


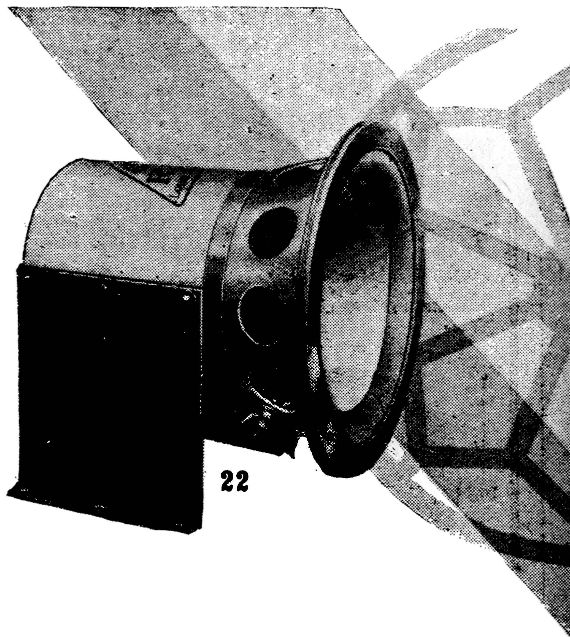
15

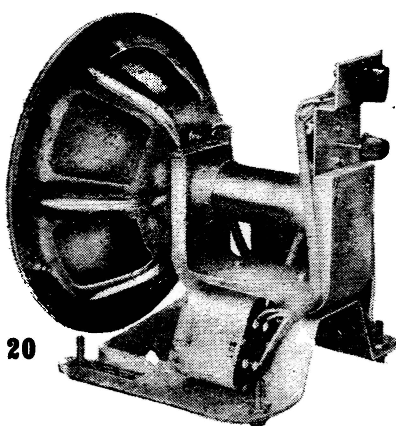
18

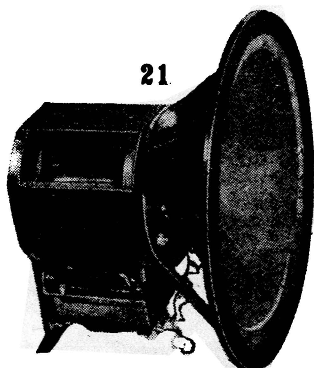


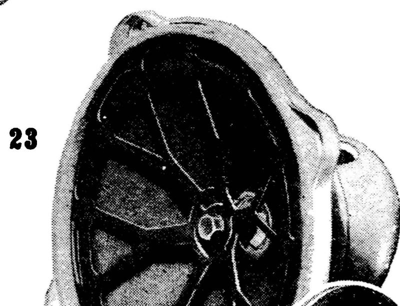
# UD
# KERS

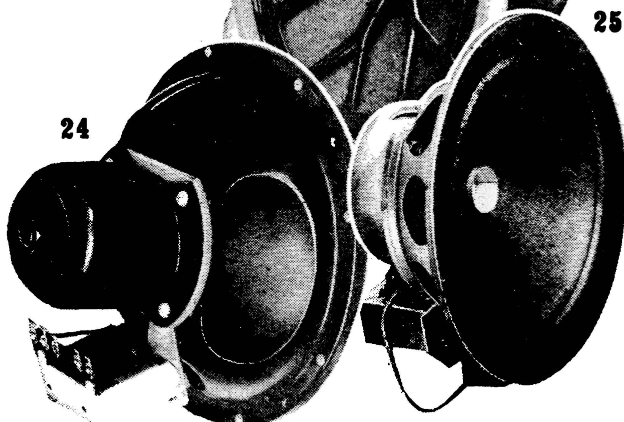

19


22

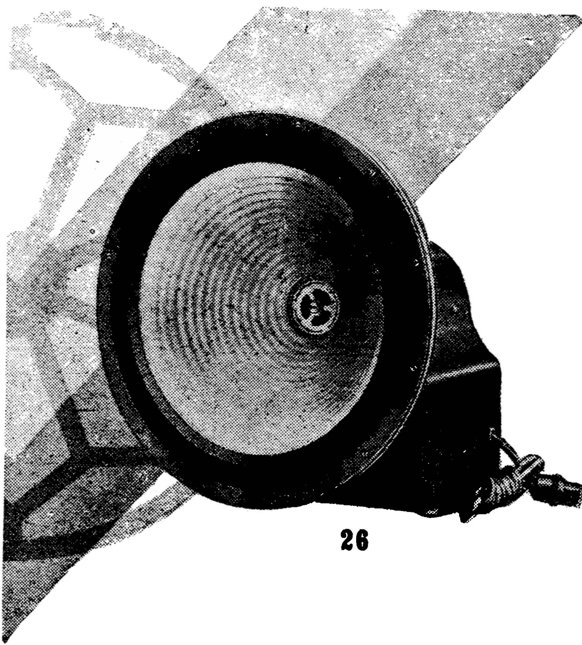

20


21

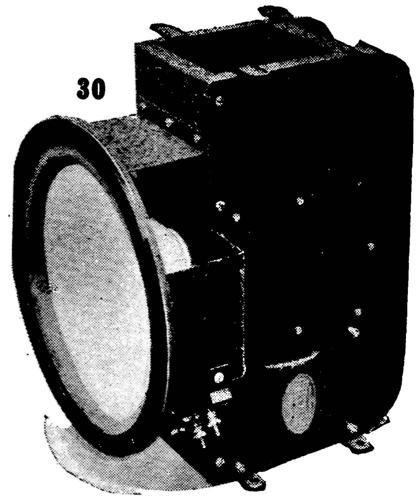

23


24

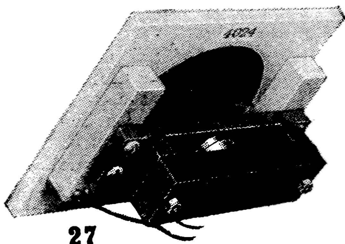
25



26



30



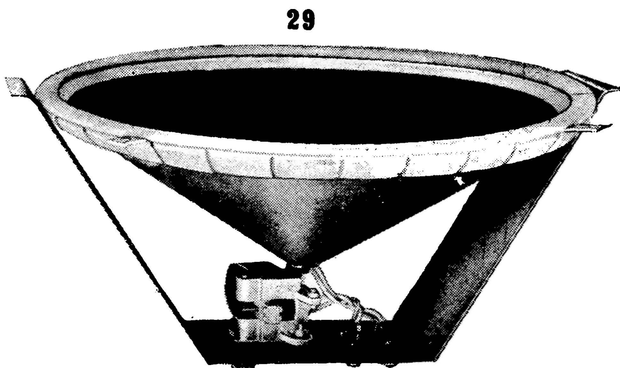

27



28

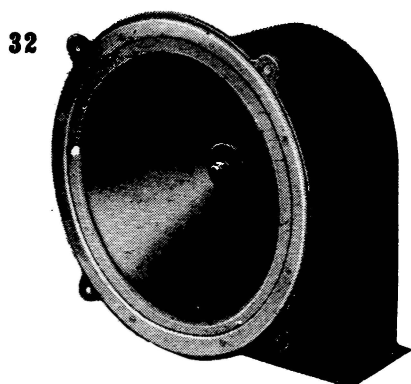



31

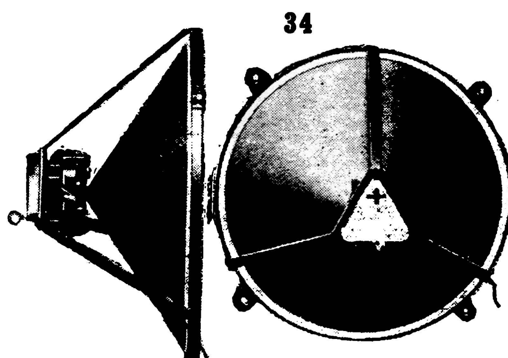


29

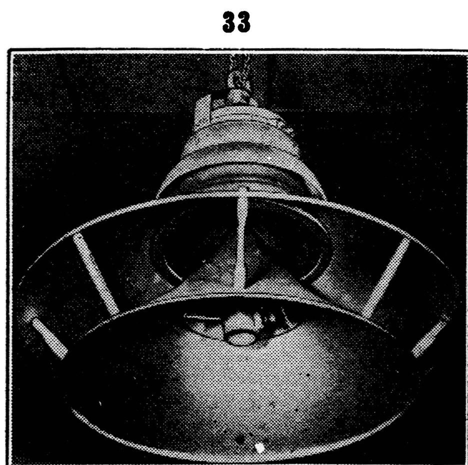
32



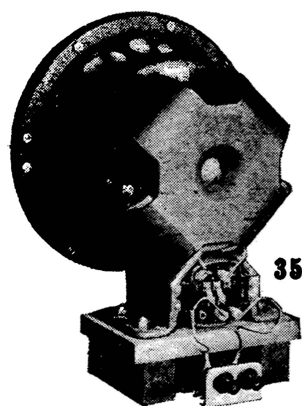
34



33



35



*1 : Ferranti M1 +*
*2 : Blue Spot*
*3 : Amplion*
*4 : Ferranti M 2*
*5 : Igranic PM.*
*6 : Blue Spot 99PM*
*7 : Parmeko PM*
*8 : Epoch 101 1/2 J*
*9 : Celestion PPM*
*10 : G.E.C. MC*
*11 : Halford Phantom XV*
*12 : Hartley-Turner*
*13 : Michell & Brown*
*14 : Baker PM*
*15 : Baker Selhurst*
*16 : Ferranti Inductor*
*17 : Amplion MC 22*
*18 : Primustatic*
*19 : Blue Spot Inductor*
*20 : Philips PM*
*21 : Ormond PM*
*22 : Rice-Kellogg Junior*
*23 : Magnavox U.K.*
*24 : Rola U.K.*
*25 : Epoch*
*26 : Rice-Kellogg Senior*
*27 : Lanchester Monitor*
*28 : Ormond N°3*
*29 : Amplion AB 14*
*30 : Ferranti AC*
*31 : Stentorian Senior*
*32 : Bakers Super Power*
*33 : Körting Germany*
*34 : Aylesbury-Trouton*
*35 : Marconiphone PM*

## LES HAUT-PARLEURS A PAVILLON

Le haut-parleur à pavillon n'a cessé de susciter un intérêt grandissant depuis 1919. C'est en effet à cette date que la conception du moteur (chambre de compression), et du pavillon, fut complètement reprise et améliorée.

En lui-même, le principe du pavillon est très ancien. Il existait bien avant l'ère de l'électro-acoustique : instruments de musique, porte voix etc.

Ce n'est qu'ensuite qu'il fut utilisé en électro-acoustique. Graham Bell s'en sert sur les premiers écouteurs téléphoniques et on le retrouve ensuite sur les phonographes à amplification acoustique (où électro-acoustique).

Ce type de transducteur permet d'obtenir des résultats très variables. De nombreux facteurs vont, en effet, intervenir sur ceux-ci. Le couplage entre la membrane et l'air se fait par l'intermédiaire du pavillon (de longueur et de forme variable). Ce type de transducteur rayonne donc, contrairement à la majorité des transducteurs étudiés jusqu'ici, d'une manière indirecte.

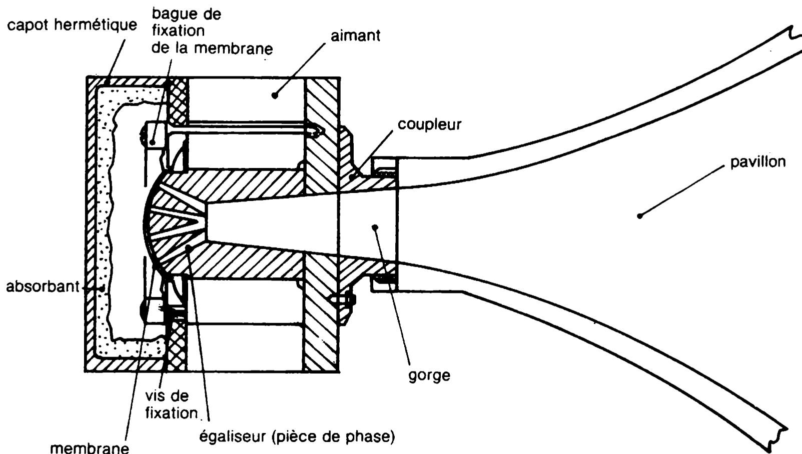



*Fig. 157 : Coupe schématique d'un haut-parleur à pavillon, composé d'un moteur, ou chambre de compression et d'un pavillon.*

On peut distinguer deux parties dans le haut-parleur à pavillon : le moteur (à chambre de compression) et le pavillon. Le moteur est basé sur une bobine mobile plongeant dans l'entrefer d'un circuit magnétique. Cette bobine mobile est en général assez courte et d'un diamètre important, par rapport au diaphragme sur lequel elle est fixée. Le nom de « chambre de compression » vient des importantes variations de pression qui s'exercent au niveau du diaphragme, lors de l'émission d'un signal. Il s'agit donc d'une source sonore à haute impédance : une petite surface

vibrante est couplée au pavillon, lequel sert de transducteur, de pavillon acoustique.

Le pavillon communique avec la chambre de compression par l'intermédiaire de son entrée appelée « gorge ». Il se termine par une « bouche » ou « embouchure » (voir figure 157). La longueur et la forme seront des éléments prépondérants pour les résultats obtenus.

Le but du pavillon est donc d'augmenter le rendement du système, grâce à un couplage progressif entre la membrane et l'air ambiant. On obtient ainsi un effet d'amplification important, à partir d'une surface vibrante à la fois petite et légère. Le rendement de l'ensemble est élevé, ce qui était impossible avec un transducteur électro-dynamique du genre Rice-Kellogg courant. On ne pouvait guère, même avec les meilleures configurations de circuits magnétiques alliées aux meilleurs matériaux, dépasser un rendement de 5 %. Pour le haut-parleur à pavillon, la limite théorique va jusqu'à 50 %.

Entre des rendements situés entre 5 et 50 % on trouve, bien sûr, des résultats qualitatifs très différents selon la conception générale des modèles et les buts recherchés. Mais quelques transducteurs de ce genre, extrêmement bien étudiés, atteignent cette valeur maximale de rendement. Nous verrons ces modèles plus loin.

Le pavillon et sa chambre de compression forment donc un tout. Cet ensemble doit réaliser une transformation graduelle de pression et s'adapter à la faible impédance que représente l'air.

**Pavillon**

Le pavillon devrait normalement être calculé en fonction des caractéristiques bien définies de son moteur, les deux éléments étant indissociables. Ceci ne l'empêche pas de prendre des formes très diverses : longueur, surface de gorge, de bouche. Ce pavillon peut avoir une section ronde, carrée ou rectangulaire. Le pavillon conique fut le premier utilisé sur les phonographes ou sur certains écouteurs téléphoniques. Il fut rapidement remplacé par des pavillons de formes de mieux en mieux étudiées. Le pavillon conique possède en effet le gros défaut d'une directivité accentuée.

C'est en 1919 que l'Américain Webster préconisa l'usage du pavillon de progression exponentielle. La directivité, ainsi que la résistance acoustique par rapport à la fréquence étaient améliorées.

Selon Olson, on peut répartir les différents types de pavillons en quatre catégories :

- cônique
- parabolique
- exponentiel
- hyperbolique

En fait certains modèles combinent deux ou plusieurs de ces progressions.

La figure 158 montre l'allure de ces différentes progressions (variation de la section en fonction de la longueur du pavillon). Noter que pour une même surface de section, il est possible d'avoir plusieurs formes, et pour les pavillons rectangulaires, plusieurs rapports hauteur/largeur. La résistance acoustique en fonction de la fréquence apparaît aussi sur ce tableau, et ce pour les différentes formes. Ce tableau est fort connu, surtout depuis sa description par Olson. Un pavillon d'expansion mixte y a été ajouté : un type à progression « hyperbo-exponentielle ». Ce genre de pavillon a été, par exemple, étudié par Jensen aux USA. sous le nom de « Hypex ».

On trouvera dans le tableau de la figure 159 les équations de ces différents pavillons. La figure 159 bis indique les rapports de variation largeur/hauteur en fonction de la largeur, et ceci pour différents pavillons. Certains de ces pavillons possèdent

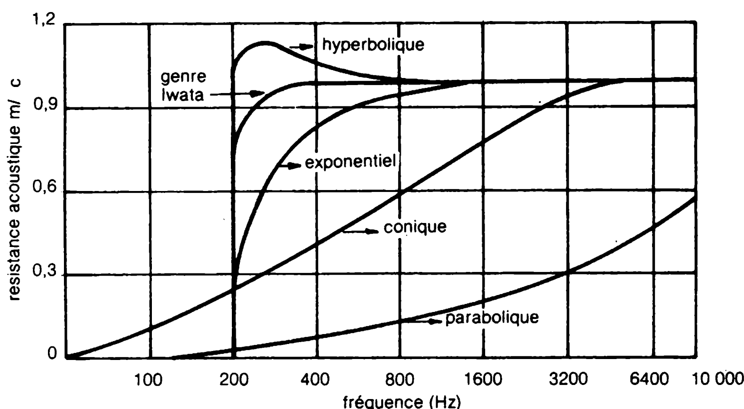



*Fig. 158 : Formes pratiques de divers pavillons connus : conique, parabolique, exponentiel et mixte (genre Iwata ou Hypex).*

dans le sens horizontal, un angle d'ouverture fixe et détermine, par exemple 60° ou 90°. D'autres pavillons, étroits près de la gorge, s'ouvrent brusquement après quelques centimètres. On trouve également des pavillons dont l'angle latéral d'ouverture est variable (composé d'une succession d'angles d'ouverture déterminés). Une caractéristique de directivité particulière est recherchée dans ce cas. On recherche parfois aussi la mise « en avant » d'une certaine partie du spectre, dans un but précis (reproduction de la voix par exemple).

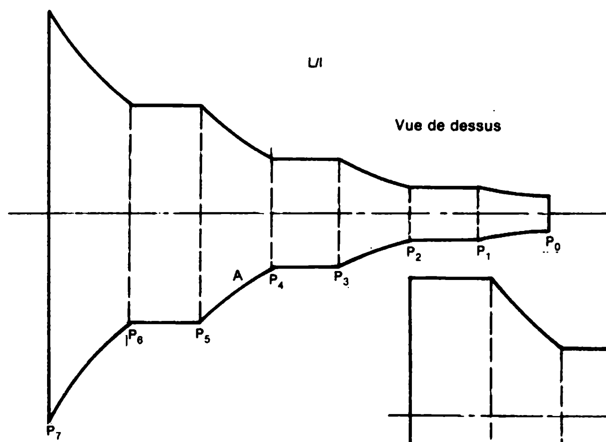
Connaître la formule générale de l'expansion n'est donc pas suffisant, si l'on ne connaît que la variation de surface d'expansion le long du pavillon. En effet, pour des pavillons de section rectangulaire, il est possible de réaliser plusieurs formes d'expansion, dans le sens horizontal ou vertical, qui possèderont malgré tout la même variation d'expansion en surface le long de l'axe de ce pavillon. Le rapport hauteur/largeur, en fonction de l'expansion générale, permet de jouer sur la directivité ainsi que sur d'autres facteurs (courbes de réponse, distorsion, etc.) Cepen-

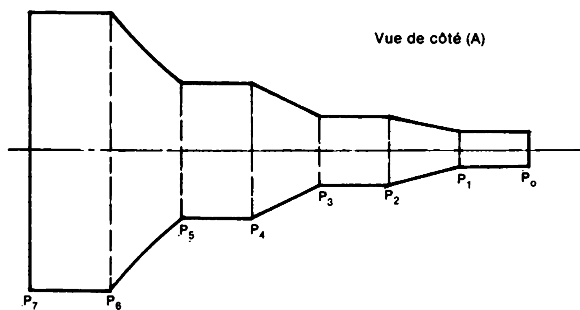
| **Forme du pavillon** | **Equation S — $S_1$** | **Equation générale (pavillon infini)** |
|---|---|---|
| Cylindrique | $S = S_1$ | $\Phi'' - c^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\Phi x^2} = 0$ |
| Cônique | $S = S_1 x^2$ | $\Phi'' - \frac{2c^2}{x} \frac{\partial \Phi}{\partial x} - c^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = 0$ |
| Parabolique | $S = S_1 x$ | $\Phi'' - \frac{c^2}{x} \frac{\partial \Phi}{\partial x} - c^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = 0$ |
| Exponentiel | $S = S_o e^{mx}$ | $\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c^2 m \frac{\partial p}{\partial x} - c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0$ |
| Hyperbolique $S = S_1$ | $\left( \cos h\frac{x}{x_o} + A \sin h\frac{x}{x_o} \right)^2$ | $r_a = \frac{\varrho c}{S_1} \frac{\sqrt{1 - \frac{1}{\mu}}}{1 - \frac{1 - A^2}{u^2}}$ <br> $x_a = \frac{\varrho c}{S_1} \frac{\frac{A}{\mu}}{1 - \frac{1 - A^2}{u^2}}$ <br> $S_1$ = section de la gorge ; <br> S = section à la distance axiale x ; <br> $x_o$ = une distance axiale de référence ; <br> A = un paramètre toujours 1. |

*Fig. 159 : Equations de divers pavillons connus.*

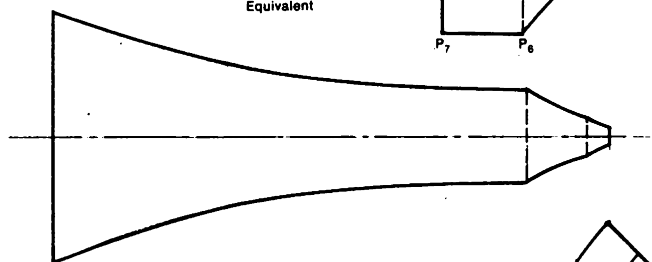
## Pavillon n° 1

OLSON



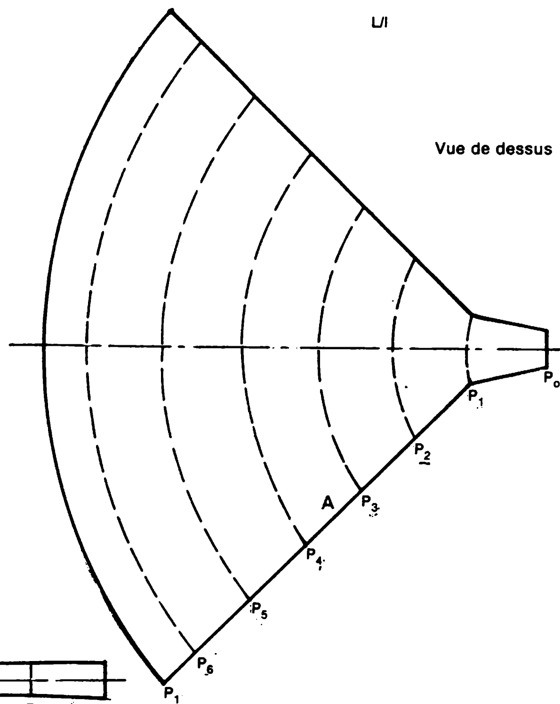



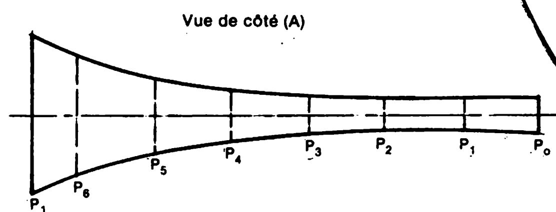

Equivalent

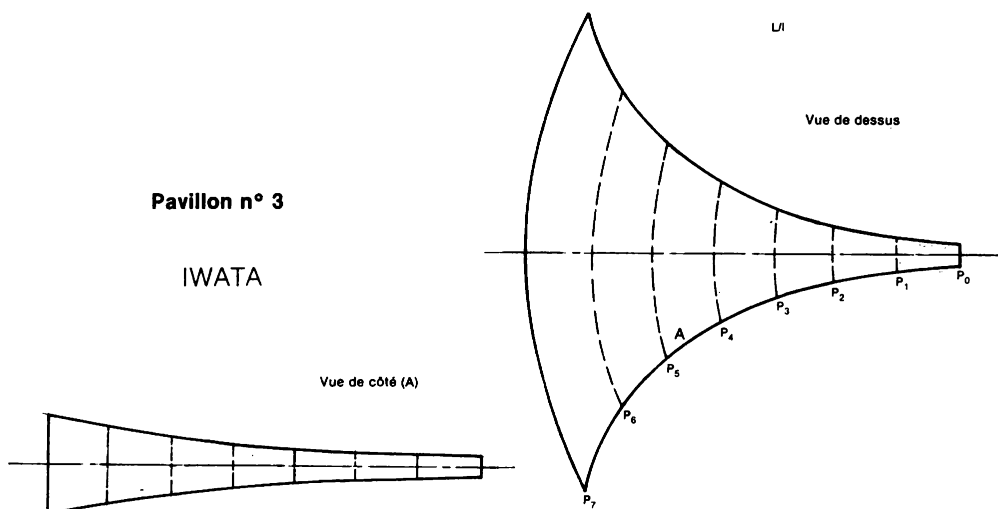


## Pavillon n° 2

EXPONENTIEL






| Pavillon n°1 | |
|---|---|
| Point | L/l |
| $P_1$ | 0,79 |
| $P_2$ | 0,79 |
| $P_3$ | 1,57 |
| $P_4$ | 0,79 |
| $P_5$ | 1,57 |
| $P_6$ | 0,79 |
| $P_7$ | 1,57 |

| Pavillon n°2 | |
|---|---|
| Point | L/l |
| $P_1$ | 2,03 |
| $P_2$ | 6,39 |
| $P_3$ | 9,39 |
| $P_4$ | 9,19 |
| $P_5$ | 7,69 |
| $P_6$ | 5,83 |
| $P_7$ | 4,07 |

| Pavillon n°3 | |
|---|---|
| Point | L/l |
| $P_1$ | 1,6 |
| $P_2$ | 2,2 |
| $P_3$ | 2,8 |
| $P_4$ | 3,4 |
| $P_5$ | 4,0 |
| $P_6$ | 4,6 |
| $P_7$ | 5,2 |

Rapport largeur/hauteur

11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1

$P_0$ $P_1$ $P_2$ $P_3$ $P_4$ $P_5$ $P_6$ $P_7$

Longueur du pavillon

(1) (2) (3)

*Fig. 159 bis : Rapports de variation largeur/hauteur vis à vis de la progression de long de l'axe du pavillon, ceci pour diverses formes de pavillon : Olson, exponentiel, Iwata.*

dant, même les calculs les plus complexes, ne peuvent permettre de prévoir la forme que prendront les fronts d'ondes à l'intérieur du pavillon, sur signal sinusoïdal ou complexe. La friction de l'air sur les parois peut provoquer des irrégularités. Des vibrations parasites où tout simplement la forme de l'expansion, (qui peut, cependant, paraître régulière visuellement), pourront avoir les mêmes conséquences. Dans la plupart des cas, ces conditions de travail réelles ne peuvent être précalculées et l'on doit se contenter d'ondes sonores supposées planes ou sphériques.

Cependant, la simple mesure de la directivité, à l'intérieur et à l'extérieur du pavillon, permet de se rendre compte que, pour des formes connues, il se produit des irrégularités dans presque tous les cas. Ce qui signifie bien que la forme des fronts d'ondes n'est ni plane, ni en portion de sphère. Il est important de revenir, une fois de plus, au livre « Loudspeakers » de Mac Lachlan. Le développement mathématique que l'on y trouve reste l'un des plus complets et des plus poussés des diverses études faites jusqu'ici sur ce sujet. Malgré sa date de parution (1934), cette étude reste des plus actuelles et des plus valables.

Mac Lachlan avait pressenti ces problèmes, et expliquait que nombre de ses calculs étaient basés sur des approximations, et non sur des paramètres fidèles à la réalité. Il en déduisait que, malgré l'obtention d'un bon compromis, il fallait s'attendre à ce que les quelques petits détails « négligés » entraînent des conséquences plus importantes que celles supposées.

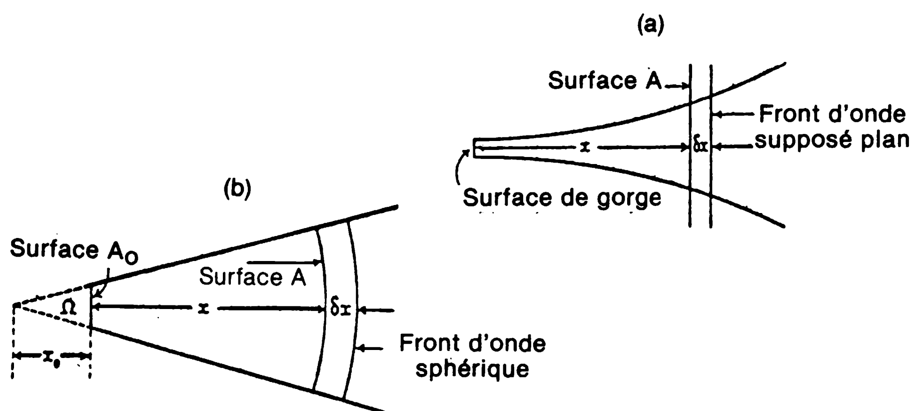



*Fig. 160 : Calcul de la forme d'expansion des pavillon à partir d'ondes planes (a) ou sphériques (b).*

La forme rectangulaire, par exemple, apporte un bon compromis pour la conception des pavillons. Ce qui n'empêche que, faire coexister une membrane circulaire possédant un début de gorge cylindrique et un pavillon passant sans transition (ou avec une transition plus ou moins brutale) à une section rectangulaire, peut avoir des conséquences relativement graves.

On ne peut assimiler l'optique à l'acoustique. Un pavillon est, cependant, comparable à un système optique composé de plusieurs lentilles qui possèderaient chacune d'elles, des défauts et des qualités.

Mac Lachlan prédisait que les calculs les plus poussés ne pourraient donner que des approximations sans plus. Il existe, cependant, des exemples où les calculs des performances correspondent exactement ou presque, aux résultats obtenus en pratique. Mac Lachlan montre (figure 160) que les calculs peuvent être effectués soit à partir d'ondes sphériques, soit à partir d'ondes planes.

Toujours selon Mac Lachlan, dans le volume constant que représente le pavillon, le changement de la masse d'air en mouvement, dû aux compressions et dépressions lors du passage des ondes sonores, est exprimé par :

$$-\frac{\partial\,(\varrho A)}{\partial t}\,\delta x$$

- $\delta x$ étant une valeur invariable avec le temps.
- $\varrho\partial\,(uA)/\partial x$ . Sx correspond d'autre part à la différence de masse d'un plan à un autre, ceci étant $\varrho$ fois la variation dans cette zone de déplacement en vitesse.

Selon la loi de continuité des fluides, ces deux quantités doivent être égales soit :

$$\varrho\,\frac{\partial\,(uA)}{\partial x} = -\frac{\partial(\varrho)}{\partial t}$$

où Sx est une courte longueur axiale entre deux fronts d'ondes parallèles, ASx le volume de cet élément et A la surface de la section, donnée comme une fonction arbitraire de x.

Ceci donne pour des amplitudes très faibles ($\varrho = \varrho_0$, soit $\partial A/\partial t = 0$) :

$$\frac{\partial \log A}{\partial x} = \frac{1}{A}\,\frac{\partial A}{\partial x}$$

. En considérant que l'onde est plane et en se basant sur l'équation de continuité cinétique, on peut déterminer l'équation fondamentale de propagation. Webster la proposa en 1919. Elle fut reprise plus tard par Ballantine, Stewart, Olson et d'autres. On la retrouve également dans une série d'articles de René Lehmann (Revue du Son n° 26, 31, 33). Cette équation fondamentale s'écrit :

$$\Phi'' - c^2\,\frac{\partial \Phi}{\partial x}\,\frac{\partial}{\partial x}(\log S) - c^2\,\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = 0$$

Mac Lachlan avait énoncé la possibilité de déterminer la propagation des ondes sonores dans divers pavillons. Ceci était possible grâce à la fonction algébrique A, donnant la surface des sections à différentes distances de la gorge. Ceci permet de différencier le logarithme. En insérant le résultat obtenu dans la première équation, on peut donc résoudre le tout dans une équation du second degré. Mac Lachlan faisait remarquer que tout ceci suppose des conditions de travail bien déterminées, celles-ci étant arbitrairement approchées par rapport aux conditions réelles :

1 - Le corps du pavillon est supposé rigide
2 - Le déplacement des ondes sonores n'est par rotatif
3 - Il n'y a pas de frictions entre les ondes sonores et les parois internes du pavillon
4 - Le volume d'air en mouvement n'a pas de propriétés visqueuses
5 - Les variations de pression sont infiniment faibles
6 - La pression est uniforme en tous points de la surface du front d'onde (supposé plan).

Comme on le voit, Mac Lachlan préssentait déjà que les phénomènes perturbatoires, dûs aux non-linéarités électro-mécano-acoustiques, rendraient difficiles un calcul précis. Ainsi, quelques mesures simples permettaient de constater que les supposées « variations infinitésimales de pressions » ne l'étaient en fait pas du tout, en particulier près de la membrane.

Mac Lachlan avait également pû mettre en évidence que l'on avait affaire à des ondes non pas planes mais sphériques. A la suite de diverses investigations, il démontra que dans le cas du pavillon cônique, les erreurs étaient plus faibles, en raison du rapport constant entre ces deux formes d'ondes.

Mais l'on sait que le pavillon cônique possède une directivité marquée. Au fur et à mesure que la fréquence à reproduire s'élève, la directivité devient plus prononcée (figure 161).

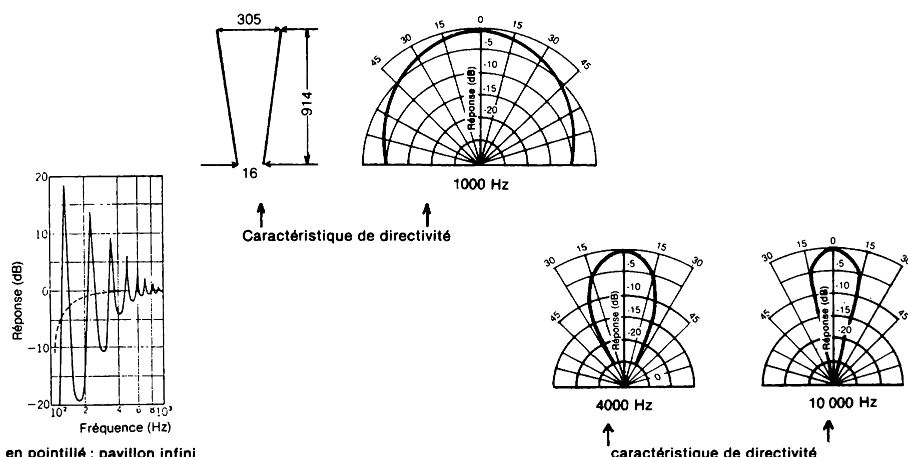



*Fig. 161 : Courbe de réponse et caractéristique de directivité d'un haut-parleur à pavillon conique.*

Webster démontra en 1919 la supériorité du pavillon exponentiel sur le pavillon cônique. La figure 162 montre les variations de réactance acoustique par rapport à la fréquence, et ce pour différentes formes de pavillons. La figure 163 représente le profil de ces différents pavillons. La figure 164, elle, représente plus spécialement, quelques formes possibles pour des pavillons exponentiels. Pour ceux-ci, si l'on considère $S_1$ (en $cm^2$) comme étant la surface de la gorge, X la distance (en cm) de la gorge au point S, on en tire la formule :

$$Sx = S_1 e^{mx}$$

m (en $cm^{-1}$) est un coefficient d'expansion. Plus ce coefficient est important et plus l'élargissement du pavillon sera rapide. La figure 164 montre schématiquement pourquoi. Pour cette condition la fréquence de coupure du pavillon est donné par :

$$f_C = 2700 \times m \text{ (Hz)}$$

Il existe de nombreux dérivés du pavillon hyperbolique (voir sa formule générale dans le tableau de la figure 159). En raison de qualités supérieures à celles du pavillon exponentiel, ils ont trouvé dans une grande majorité une application en haute-fidélité.

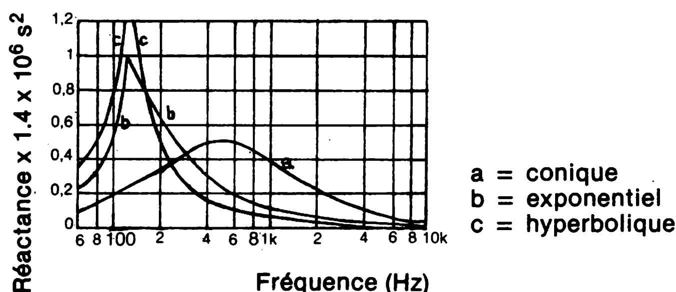



*Fig. 162 : Variation de résistance et de réactance acoustique de divers pavillons.*

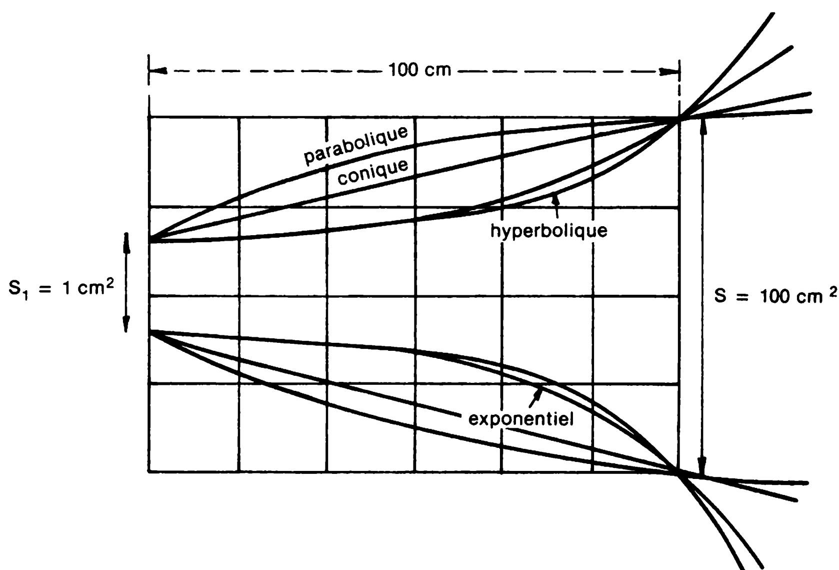



*Fig. 163 : Forme pratique d'expansion de divers pavillons. Ces formes d'expansion représentent les variations de surface le long de l'axe du pavillon. Pour les pavillons rectangulaires, il est possible de jouer simultanément sur les rapports largeur/hauteur, ce qui peut donner de nombreuses variantes pour une même progression en surface.*

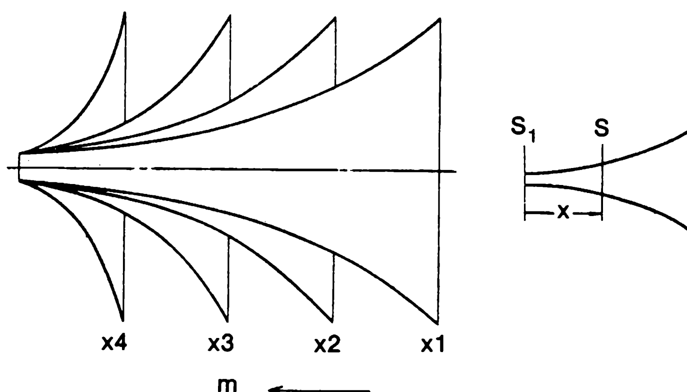



*Fig. 164 : Forme pratique de divers pavillons exponentiels où l'on remarque l'influence de m sur l'ouverture.*

Au départ de la gorge du pavillon de surface $S_1$ (cm²), en prenant un coefficient d'expansion m ($cm^{-1}$), on calcule la surface de section au point x, selon la formule :

$$Sx = S_1 \left(\cos h \frac{mx}{2} + t \sin h \frac{mx}{2}\right)^2$$

t est un paramètre fonction de l'expansion du pavillon.

La figure 165 montre les résultats obtenus pour deux valeurs de m et de t, comprises entre 0 et 1.

Toutes ces formules de pavillons ne considèrent que des variations de surface le

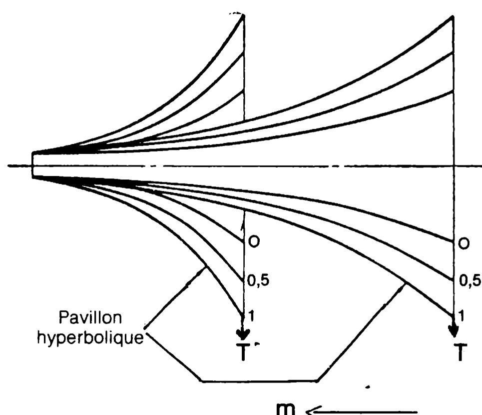



*Fig. 165 : Formes pratiques obtenues sur un pavillon hyperbolique, à partir de variantes das les valeurs de T ou de m.*

long de l'axe. Il a déjà été évoqué que les pavillons rectangulaires peuvent avoir des rapports hauteur/largeur très différents pour une progression en surface le long de l'axe identique. Les très nombreuses variantes possibles vont avoir des résultats divergents. C'est ainsi que sont apparus des pavillons sur le marché, résultat de formules d'expansion très complexes, parfois fruits d'expérimentations empiriques.

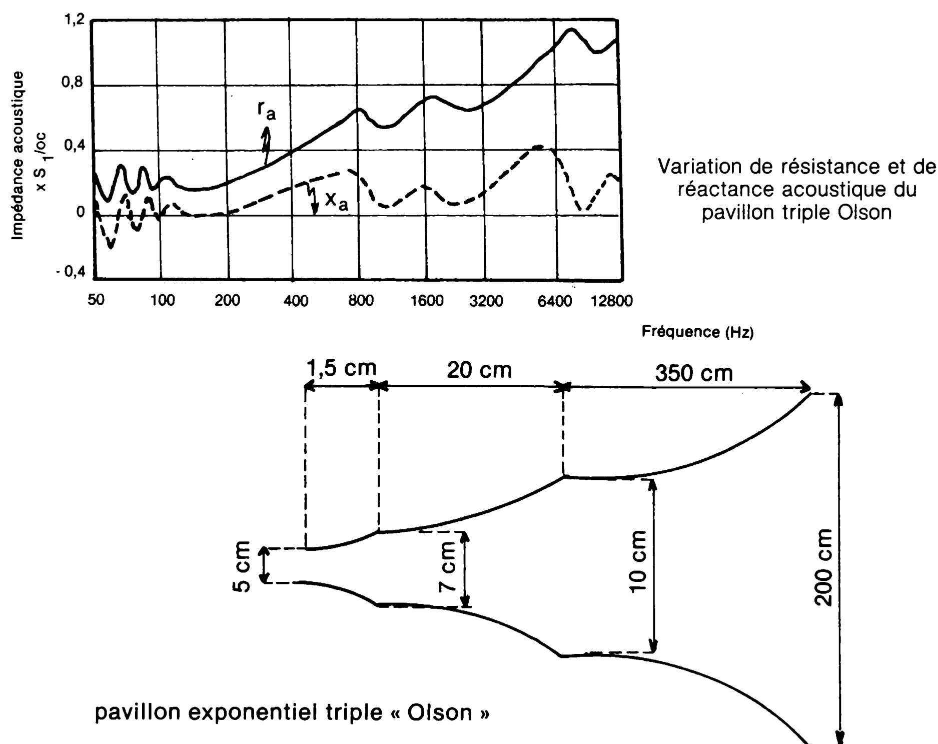



*Fig. 166 : Exemple de pavillon exponentiel triple proposé par Olson en 1938.*

Certains présentent des variations brutales d'expansion, verticales ou horizontales. C'est le cas du fameux pavillon Olson, conçu selon un mode exponentiel triple. La figure 166 représente ce pavillon en coupe. Conçu en 1938, il recherchait une résistance acoustique de gorge pratiquement proportionnelle à la fréquence.

## Problèmes relatifs aux formules d'expansion

Pour des pavillons de section rectangulaire, il est possible, jouant simultanément sur l'expansion en largeur et en hauteur, d'obtenir des pavillons dont l'expansion acoustique s'accompagne d'une expansion géométrique régulière. Ceci n'est, cependant pas toujours le cas. La figure 159 bis montre quelques exemples. Sur ces modèles, l'expansion change brusquement, alors que la variation de surface suit toujours une courbe régulière. Pour ces pavillons, la largeur d'ouverture suit généralement un angle déterminé (60°, 90°, 120°) ceci après une ouverture selon un angle plus fermé près de la gorge. D'autres pavillons, par contre, présentent une gorge d'expansion faible, débouchant sur une partie élargie, une sorte de « renflement », qui se reserre ensuite avant de s'ouvrir sur l'angle d'ouverture latéral principal. De nombreux pavillons hi-fi destinés à la sonorisation utilisent cet artifice.

Ce renflement a pour but, soit d'améliorer le rendement dans une certaine partie du spectre, soit d'apporter un effet acoustique recherché.

Judicieusement calculé, ce renflement peut améliorer l'impression subjective de « charge acoustique ». Ceci est surtout vrai pour la zone qui suit la fréquence de coupure du pavillon.

On sait qu'il est souhaitable, surtout en hi-fi, de choisir une fréquence de coupure basse deux fois et demi la coupure naturelle du pavillon. Ainsi, pour un pavillon (exponentiel ou hyperbolique) coupant à 200 Hz, la fréquence de coupure devrait se situer aux alentours de 500 Hz. L'utilisation d'un « renflement » permet de « tricher » un peu, rendant ainsi possible une coupure électrique du moteur un peu plus basse que celle conseillée. Certains spécialistes porteront certaines objections à l'utilisation de ces renflements. On peut aussi envisager un mode d'expansion qui comporterait des variations brusques le long de l'axe. Ces artifices, bien que capables d'améliorer certains paramètres (directivité, linéarité) peuvent détruire partiellement l'information transmise (déformation trop brusque du front d'onde, friction plus importante de l'air sur les parois à certains endroits, augmentation brusque de la surface du front d'onde, apportant une distorsion par variations hétérogènes, trop marquées, de la pression, etc.

M. Iwata, un spécialiste japonais des pavillons, affirme que la qualité de reproduction dépend directement de l'allure de la progression sur les pavillons rectangulaires. Il faut traiter simultanément tous les paramètres déjà évoqués, sans oublier la directivité. Le « son de porte voix », de « pavillon », si détesté de certains, n'est pas le son typique de ces transducteurs. Il est seulement le résultat d'un assemblage moteur + pavillon mal étudié. Il reste vrai que ce type de transducteur favorise de telles erreurs. Selon Iwata, certaines idées d'Olson sont excellentes, comme la recherche d'une bonne linéarité dans la variation de résistance acoustique, vue de la gorge. Par contre, des pavillons aux variations brusques d'expansion ne peuvent que dégrader le signal sonore.

Si l'on considère une onde sphérique, il serait souhaitable de rechercher une expansion permettant des fronts d'ondes perpendiculaires par rapport aux parois, et ceci sur toute la surface interne du pavillon. Seul le pavillon cônique répondrait à cette contrainte, nécessaire à un front d'onde sphérique.

En effectuant des mesures très précises à l'intérieur du pavillon, on constate

près des parois une baisse assez brutale de pression (friction de l'air sur les parois, état de surface de ces parois, etc).

Un des pionniers de l'électro-acoustique, P.G.A. Voigt (qui travailla pour la firme Edison Bell avant de diriger la société anglaise Lowther, réputée pour ses haut-parleurs), proposa en 1922 un curieux pavillon baptisé « Tractrix Horn ». Ce pavillon, de section carrée, avait une forme d'expansion telle que les fronts d'ondes devraient (en théorie du moins) être perpendiculaires aux parois. La figure 167 montre un exemple de ce pavillon. Ses résultats remarquables étaient en partie dus aux qualités exceptionnelles du moteur dont il était équipé. Paul Voigt, persuadé de l'importance du circuit magnétique sur la qualité de reproduction, n'hésitait pas à se servir de circuits magnétiques énormes, extrêmement puissants. On retrouve d'ailleurs, cette conception sur les haut-parleurs Lowther, dont l'induction dans l'entrefer pouvait dépasser 22 000 Gauss.

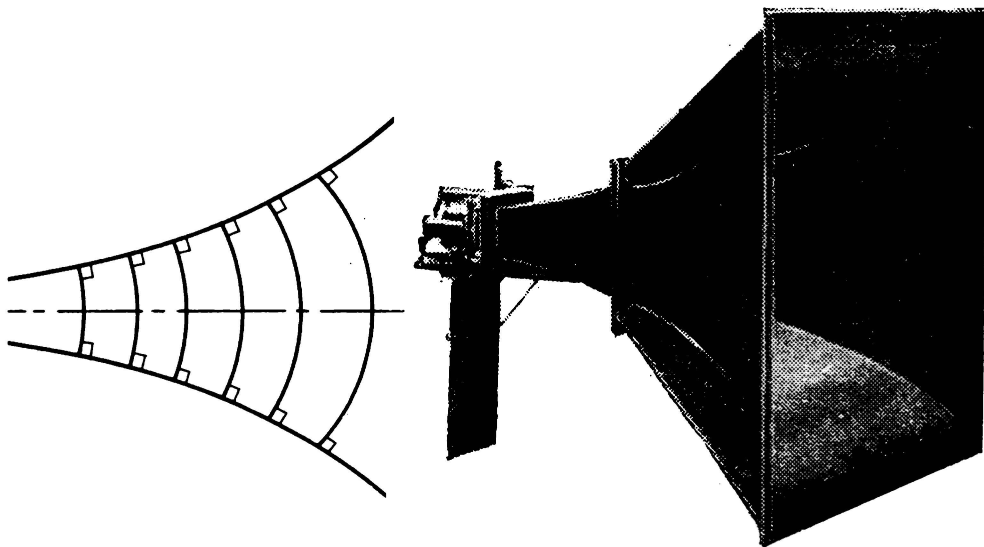


*Fig. 167 : Pavillon « Tractrix », de 4 pieds, réalisé par P.G.A. Voigt, pour lequel le brevet fut déposé vers 1924. Remarquer que, théoriquement, l'onde sonore se termine à 90° par rapport aux parois. Les moteurs Voigt étaient par ailleurs très réputés pour leurs qualités et leurs aimants très puissants.*

Ce pavillon Tractrix trouva de nombreuses applications, notamment en sonorisation et pour le cinéma parlant.

Ainsi, si l'on considère les travaux de Webster, Voigt et bien d'autres, on se rend compte que tout avait pratiquement déjà été dit et étudié sur les pavillons. En 1934, Mac Lachlan démontrait que selon les formes d'ondes, la variation de pression à l'intérieur d'un pavillon était, en fait, relativement irrégulière. Il obtint, en plus ce résultat avec des possibilités de mesures réduites, sans doute précises mais mal connues. Il présentait, toujours dans le fabuleux livre auquel il est fait souvent référence, des résultats de mesure en phase, en pression. Selon lui, les fronts d'ondes n'étaient ni plans ni sphériques, mais présentaient des formes bien plus irrégulières : suivant l'emplacement et la fréquence reproduite, il pouvait se produire des irrégularités, des sortes de tourbillons, des « trous » à des endroits normalement impensables, ou imprévisibles, même par le calcul.

La figure 168 (publiée en 1934) montre à quel point Mac Lachlan avait su voir loin dans le domaine du haut parleur. Il inventa même la plupart des méthodes de mesure qu'il utilisa, n'oubliant pas l'incidence de divers phénomènes pertubatoires qui faussaient des calculs pourtant poussés.

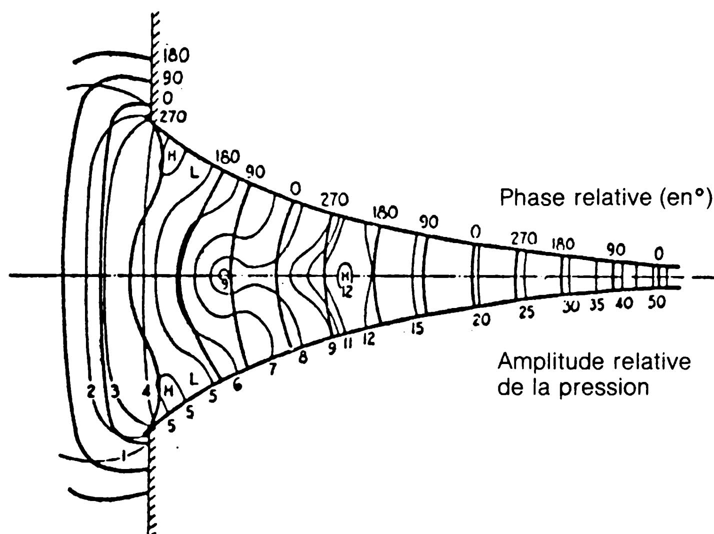



*Fig. 168 : Résultats de mesures, publiés en 1934 par Mac Lachlan, concernant la forme de propagation des ondes sonores à l'intérieur du pavillon. Ici, test à la fréquence de 800 Hz. On voit que les variations de pression sont irrégulières à certains endroits et que la vitesse de propagation des ondes n'est pas constante. Ceci a été constaté malgré des parois de courbe régulière. Ce test montre l'avance considérable de Mac Lachlan sur son temps. Ce n'est, en effet, qu'en 1978 que l'on a pu mettre en évidence, grâce à des méthodes de mesure ultra-modernes, ces phénomènes.*

Ce n'est qu'aux environs de 1978 que des firmes japonaises comme Hitachi ou J.V.C. purent démontrer que Mac Lachlan avait raison.

Des moyens très sophistiqués de mesure de haute précision durent être employés pour ce faire. Les figures 169 et 170 montrent, par exemple, les résultats obtenus à l'aide de calculateurs analogiques, d'interféromètres à laser, de microphones travaillant selon la méthode de « scanning » (balayage en coupes successives) permettant de représenter graphiquement (parfois sous forme tridimensionnelle) la forme de ces irrégularités, jusqu'ici seulement ressenties ou supposées.

Sur la figure 168 par exemple, à partir d'une certaine zone, l'onde se déforme et provoque une sorte de tourbillon. Ceci était pratiquement imprévisible, et, sans l'aide de ce genre de mesure, seule une écoute subjective pouvait déceler ces défauts.

Sur ce point, la firme Western Electric a certainement fait les travaux les plus poussés, y compris ceux portant sur la qualité subjective de reproduction. Cette firme avait une division portant le nom de « E.R.P.I. », qui devint ensuite « All Technical Products » puis enfin l'abréviation de ce dernier nom, soit « Altec », nom connu de tous. On trouvait dans cette division des pavillons aux performances remarquables, avec une forme d'expansion parfois très irrégulière.

Il est certain que cette société Western Electric, à l'origine du moteur à chambre de compression de haute qualité, n'avait pas étudié ces pavillons « à l'oreille », c'est à dire de façon arbitraire ou empirique. Ces résultats, fantastiques pour l'épo-

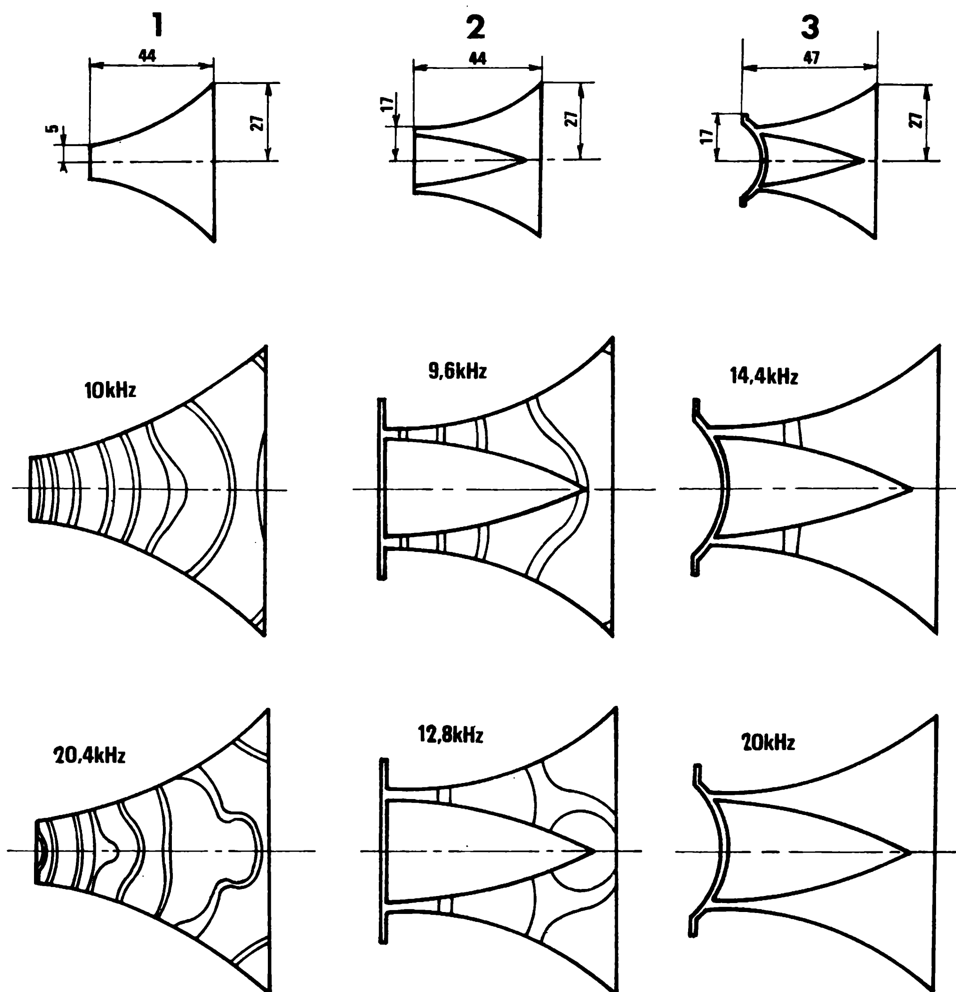



*Fig. 169 : Mesures effectuées par la firme japonaise Hitachi, dévoilant la forme réelle des ondes sonores à l'intérieur de différents pavillons. Comme on le voit, certaines irrégularités sont insoupçonnables d'après l'examen seul des formes d'expansion des pavillons. Inversement, certaines variations brusques de courbure à certains endroits peuvent corriger ces défauts, ce qui est le cas de quelques pavillons aux courbures mixtes, lesquelles pourraient cependant paraître plus arbitraires qu'étudiées en fonction de ces phénomènes.*

que, étaient plus vraisemblablement le fruit de recherches intenses dans tous les domaines de l'électro-acoustique, de la psycho-acoustique et bien d'autres domaines techniques. Ainsi, quelques pavillons Western Electric, de forme pour le moins curieuse, avaient en réalité un but précis et étaient soigneusement étudiés : une augmentation brusque de l'expansion à un endroit donné était volontaire et non fantaisiste, destinée, par exemple, à éviter un phénomène tourbillonnaire. La forme en « escargot » de certains pavillon Western Electric, destinée, en principe, à réduire l'emplacement en profondeur (pour une utilisation au cinéma où ces systèmes étaient placés derrière l'écran) servaient aussi à réduire le taux de distorsion par harmonique 3, ou encore augmentait la vitesse de propagation etc. Ces théories semblent vérifiées par les résultats pratiques obtenus.

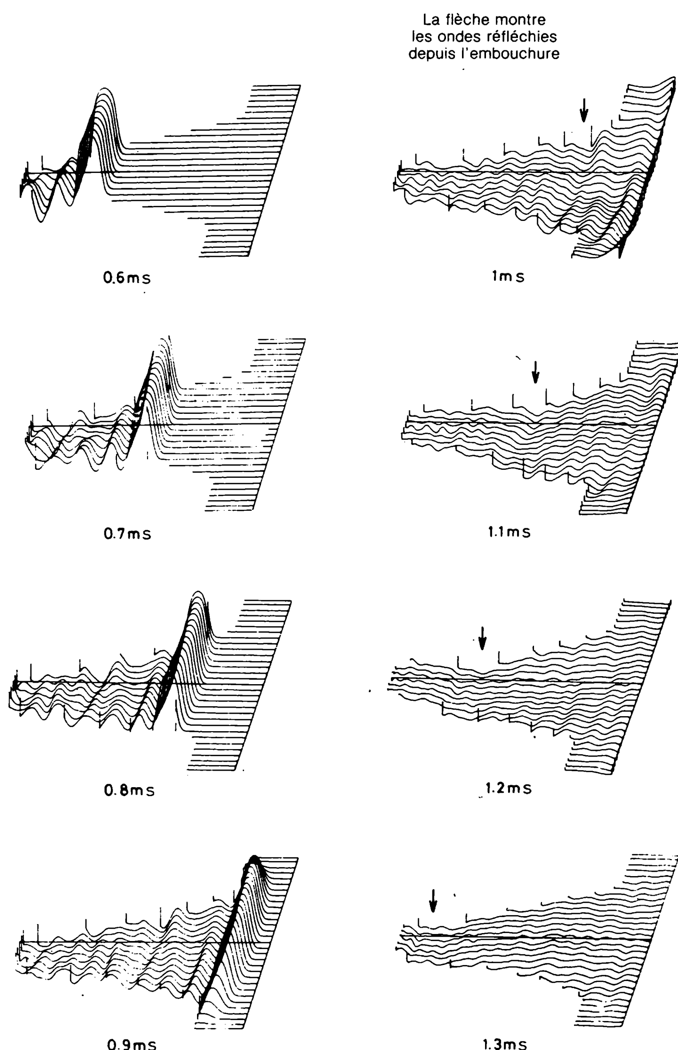



*Fig : 170 Mise en évidence des réflexions parasites près de l'embouchure du pavillon, ainsi que de la forme des ondes. Cette méthode de mesure est complexe demandant l'usage de calculateurs électroniques couplés à des microphones effectuant un balayage automatique devant le pavillon mesuré. Les flèches montrent les retours d'ondes depuis l'embouchure (J. V.C., Japon).*

## Le pavillon Western Electric 15A

Le modèle 15A fut un des nombreux pavillons repliés réalisés par Western Electric. Commercialisé en 1928, son succès fut énorme. Destiné au cinéma parlant, encore rare à l'époque, il procurait des résultats exceptionnels. Cette « signature » de la Western Electric venait très certainement d'une étude très poussée de ses créateurs Wente et Thuras.

Sa forme bizarre, l'extrême complexité de sa formule d'expansion et, à l'opposé, l'excellence des résultats obtenus, montre avec quelle maîtrise leurs concepteurs

ont su maîtriser les principaux défauts constatés jusqu'alors. Le succès du pavillon 15A, réalisé après de nombreuses expériences, fut le point de départ d'une génération de pavillons, soit droits, soit repliés. Certains de ceux-ci possédaient des doubles parois renfermant du sable (évitant les résonances de parois), et un grand modèle allait jusqu'au grand luxe de se voir injecter, près de la gorge, de la vapeur d'eau dans le pavillon (afin d'augmenter le couplage membrane/pavillon).

Ce sont, par exemple, les modèles WE 15B (à deux moteurs), les variantes WE 21A, WE 66A (pavillons repliés), ainsi que les séries multicellulaires ou sectorales.

Le rendement de ces transducteurs était excellent (il atteignait parfois 50 %) ainsi que la qualité de reproduction. La figure 171 montre une vue en coupe du modèle 15A. Ce pavillon était couplé à un moteur de conception si ingénieuse et si proche de la perfection que la plupart des chambres de compression actuelles en sont directement dérivées.

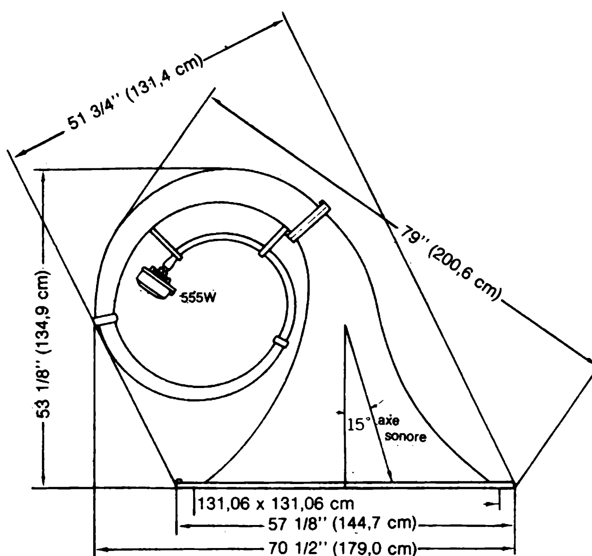



*Fig. 171 : Pavillon replié Western Electric WE 15A. Bien que de forme bizarre, il s'agit d'un pavillon remarquablement calculé, en fonction de très nombreux paramètres. Il obtint un grand succès commercial dans les applications du cinéma parlant.*

Ce pavillon était le fruit d'une patiente recherche, qui avait débuté avec des pavillons droits, courbés à 45° ou à 90°, réalisés expérimentalement, et de formes d'expansion variées.

La revue américaine Bell System Journal (pages 135/204, numéro de janvier 1928), parle de « monstrueux pavillons ». Il dut faire une sérieuse impression outre-atlantique puisque, la fameuse revue anglaise Wireless World lui consacrait plusieurs pages en juin et juillet 1929. Ces figures 172, 173 et 174 montrent l'aspect de ce pavillon, encastré dans le plafond, à diverses étapes des expérimentations qui devaient aboutir au modèle 15A. Ce pavillon 15A avait un tel rendement qu'il ne nécessait qu'une puissance de 2,3 Watts pour remplir de musique une salle de 2000 places.

Sur la figure 175, on voit l'aspect schématique de ce pavillon replié en « escargot ». Cette forme était une extrapolation dérivant des pavillons tels ceux des figures 172 et

173, et de leurs résultats. Ces pavillons sont, aujourd'hui encore, très recherchés.

Récemment, au Japon, quelques maisons comme Kanno Seisaku Co. ou Tatématsu Kogeï, ont réalisé (ou modifié pour un usage domestique) des pavillons identiques, pour les amateurs de haute fidélité attirés par les réalisations Western Electric. Sur la figure 176, on voit l'exemple d'un pavillon 66A, une sorte de 15A miniature, réalisé par la maison Tatématsu Kogeï.

Nombreux sont ceux qui ont tenté de retrouver les formules, souvent très complexes, qui réglaient l'expansion de ces pavillons. Même une fois retrouvées, il reste impossible d'expliquer, par raisonnement, le pourquoi de ces brusques variations. Or, le résultat audible est ideniablement bénéfique. Des chercheurs essaient encore aujourd'hui d'en

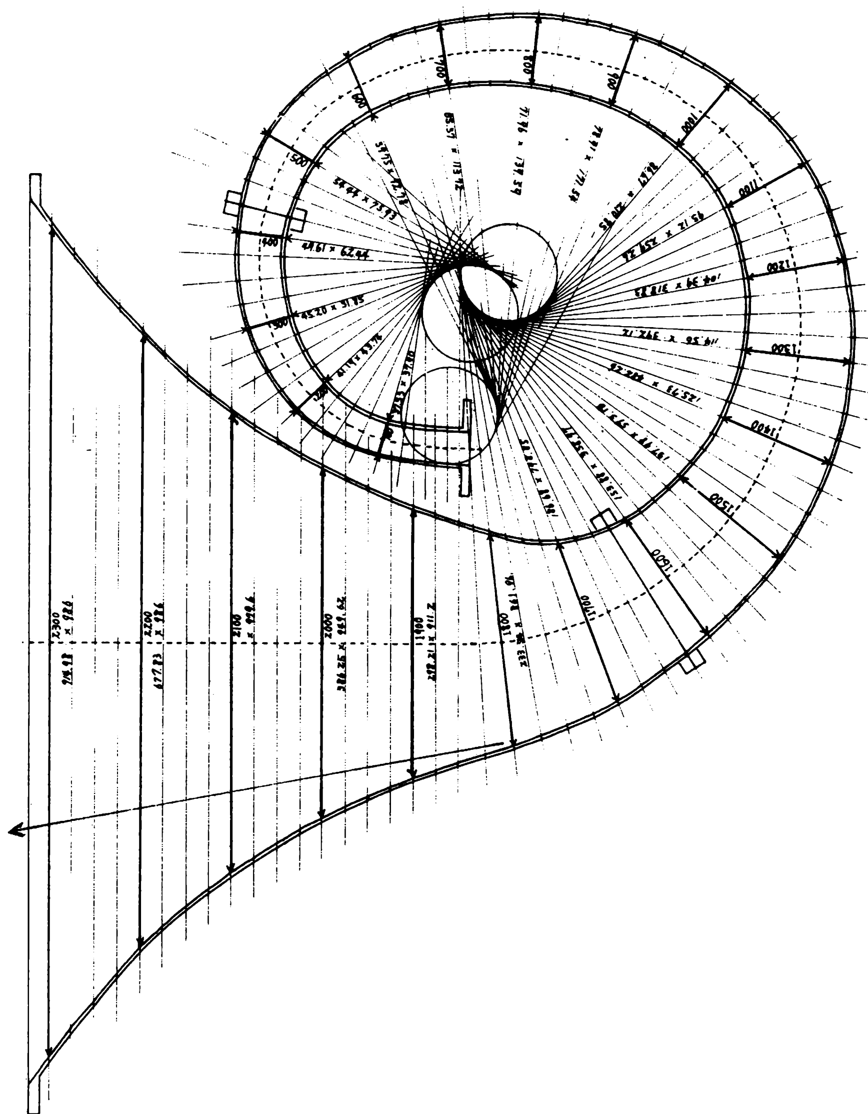


*Fig. 176 : Vue en coupe, avec cotes, du pavillon WE 66A, un modèle de dimensions plus réduites que le 15A et donc mieux adapté à l'écoute en appartement. Il a été réalisé en petite série récemment par un petit artisan japonais, la maison « Tatematsu Kogeï ».*




*Fig. 172 : Vue de l'extérieur du pavillon exponentiel étudié par E.C. Wente et A.L. Thuras. Cette étude mena à la création du pavillon 15A, en 1928. Cette méthode de grand pavillon de grave encastré dans le plafond a été reprise de nombreuses fois depuis, en particulier pour l'utilisation en haute fidélité.*

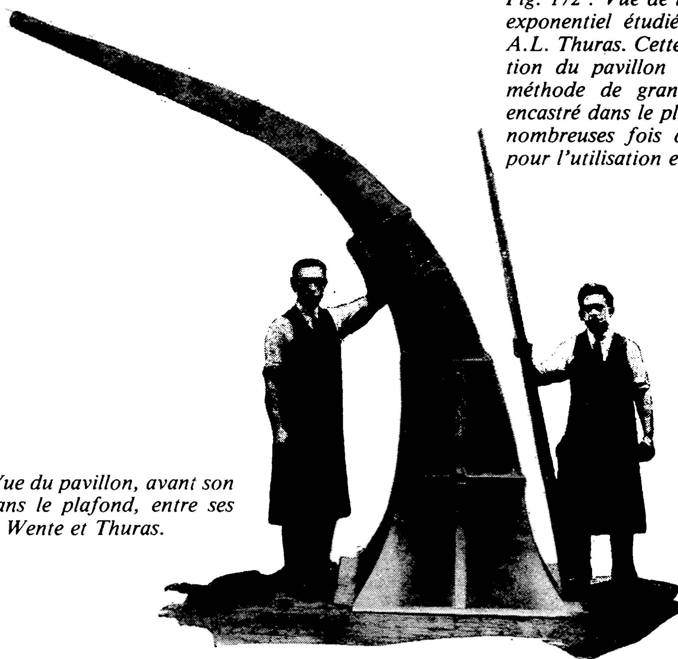


*Fig. 173 : Vue du pavillon, avant son montage dans le plafond, entre ses réalisateurs Wente et Thuras.*



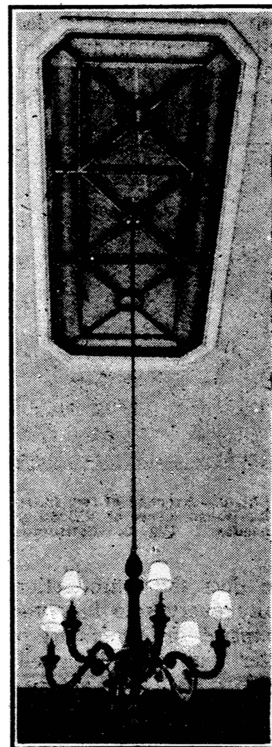


*Fig. 174 : Vue de l'embouchure du pavillon de 25 pieds de longueur, pour lequel la fréquence de coupure était de 44 Hz. L'embouchure était masquée par une grille et un lustre.*

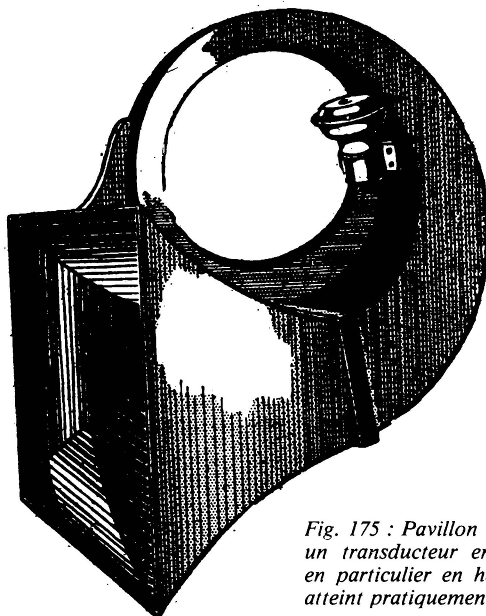


*Fig. 175 : Pavillon 15A. Ses qualités en ont fait un transducteur encore utilisé de nos jours, en particulier en haute fidélité. Le rendement atteint pratiquement 50%, ce qui est étonnant.*

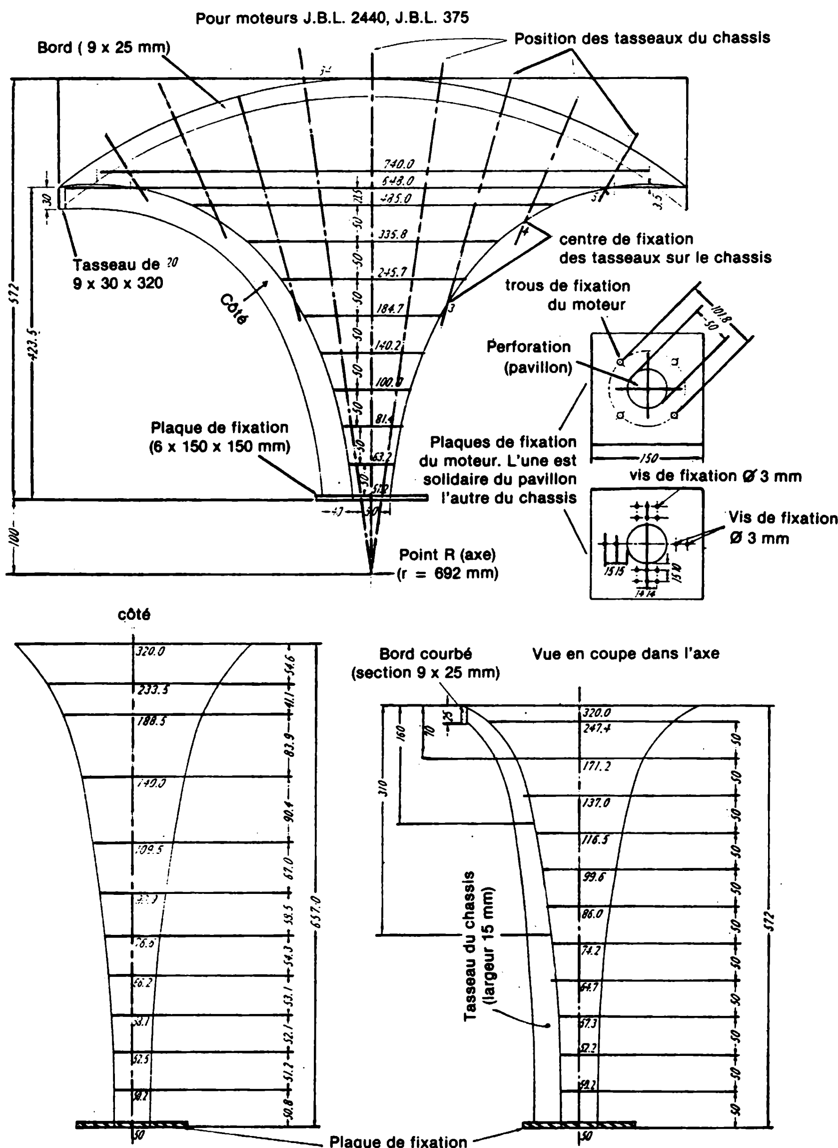



*Fig. 177 : Détails d'un pavillon Iwata, donnant des résultats remarquables, et conçu pour les moteurs courants du genre J.B.L. 2440 ou 375.*

percer les mystères, et ils ne sont pas aidés en cela par les principes, plus que vagues, révélés par les concepteurs.

Le pavillon 15A a été, dès sa parution sur le marché, un modèle largement imité à travers le monde. On le trouve sous des marques anglaises, américaines, allemandes, italiennes ou japonaises. Il a même inspiré quelques constructeurs de haut-parleurs haute-fidélité. Ainsi, au Japon, Nippon Victor Company (nommé J.V.C. à l'étranger) Y.L. (Yoshimura Laboratory), Kato, Goto Unit et bien d'autres ont ainsi réalisé, avant ou après la seconde guerre mondiale, des moteurs ou des pavillons fortement inspirés des séries Western Electric.

Pour en revenir à ce pavillon 15A, sa forme repliée, les nombreux coudes, les absorbants collés à certains endroits n'ont, en principe aucun avantage (mis à part des questions de rigidité ou d'amortissement mécanique), et procurent une chute notable de l'aigu. Sur le 15 A, par contre, il a été prouvé que cette forme réduisait le taux de distorsion par harmonique 3 et augmentait, selon certains, le temps de propagation à l'intérieur du pavillon. Ceci est mal vérifié, mais possible.

Selon Iwata, toutes ces considérations ne viseraient qu'un but « esthétique » du son. Serait ainsi recherché un son particulièrement « attrayant », donnant l'impression de très grande définition, ou de grande dynamique. L'acousticien Iwata serait contre ces méthodes. Nous avons retenu un des innombrables pavillons réalisés de ses mains, remarquable à l'écoute et aux mesures. Adapté à des moteurs courants (J.B.L. par exemple), ses dimensions sont données sur la figure 177. Il est réalisé en feuilles minces de carton dur, imprégné de résine époxy, un matériau utilisé pour les transformateurs (couches isolantes placées entre les bobinages) et vendu en feuilles de grandes dimensions. Ces feuilles sont soigneusement découpées, ajustées et collées une par une sur le châssis (colle à l'époxy rapide). Ce châssis est réalisé en bois, à partir de planches de contreplaqué de 15 mm d'épaisseur. Ces planches sont soigneusement découpées et collées une à une sur le châssis, également réalisé en contreplaqué de 15 mm d'épaisseur. Une fois réalisé, le châssis, fait de planches collées sur leur tranche, rappelle une coque de bateau en construction.

Les feuilles de carton sont, ensuite, collées sur la tranche de ces tasseaux (18 pour les parties supérieures et inférieures). Le collage à la colle époxy rapide permet un travail rapide et propre, et évite les frais d'un moule, dont le prix est toujours très élevé. Le montage terminé, il suffit d'épaissir, du côté extérieur, les parois du pavillon (traitement étanche comme de la colle époxy par exemple) et d'amortir le tout par 3 ou 4 cm de plâtre où de ciment. On peut également utiliser une paroi double, sablée intérieurement, comme sur certains pavillons de qualité (exemple Onken SC 500 Wood, Japon). Cette idée avait, d'ailleurs déjà été utilisée par Western Electric sur des pavillons multicellulaires. Ces quelques informations, succintes, mais suffisantes, pourront permettre à l'amateur intéressé une réalisation à peu de frais.

Ses performances sont remarquables, tant du point de vue qualité subjective (linéarité, définition, absence d'effet de « porte voix ») que du point de vue mesures (linéarité, faible taux de distorsion par harmonique 3,, excellente caractéristique de directivité). Ceci est d'autant plus étonnant que la courbe d'expansion de ce pavillon est régulière, tant en variation de surface le long de l'axe qu'en variation d'expansion dans le plan vertical ou horizontal. Autre point intéressant : la linéarité de variation de la distorsion en fonction de l'allure spectrale de la courbe de réponse amplitude/fréquence. Pour ce pavillon Iwata, la courbe de distorsion et la courbe amplitude/fréquence sont régulièrement liées, ce qui n'est pas le cas d'autres pavillons qui, avec les même moteurs, donnent généralement une courbe beaucoup plus irrégulière. Il en est de même pour la caractéristique de distorsion par harmonique 3, pratiquement équidistante par rapport à la courbe d'harmonique 2 tout le long du spectre. Ce cas se présente très rarement. C'est pourquoi l'exception que représente le pavillon Iwata méritait une description détaillée.

Pour terminer sur ce sujet, Iwata précise, cependant, que ce pavillon n'est qu'une « approche », car le « design » idéal devrait être tiré des caractéristiques de la chambre de compression, réalisant ainsi un ensemble indissociable.

La juxtaposition d'une membrane ronde et d'une embouchure rectangulaire très aplatie est, aussi, une source de problèmes. Certais amateurs (surtout au Japon) sont fidèles au pavillon circulaire. Certains modèles circulaires (mais excellents) doivent, cependant leurs qualités à la présence d'un moteur de très haute qualité.

Pour le pavillon Iwata, le seul regret est d'ignorer la formule d'expansion, applicable, selon Iwata lui-même, à de nombreuses variantes. Ce « Know-How », résultant de

longues recherches, n'a pu être divulgué, non pas par souhait de conserver secrêt quelques formules, mais plus simplement parce que les récents dépôts de demandes de brevêts d'invention ne le permettaient pas.

En ce qui concerne l'embouchure du pavillon, on sait que l'effet de bord apporte des perturbations gênantes (retour d'ondes dans le pavillon, irrégularité des lobes de directivité etc.) Cet effet de bord est particulièrement ressenti sur les haut-parleurs de médium et d'aigu.

Toujours selon Iwata, il serait également préjudiciable à la reproduction des sons graves. Une de ses méthodes, pour combattre ce phénomène, consite à réaliser, près de l'embouchure, un couplage progressif avec l'air. Ce procédé consiste à munir les embouchures de fentes (figure 178). Il est utilisé sur les tunnels (brevet Iwata) et sur les silencieux d'armes à feu.

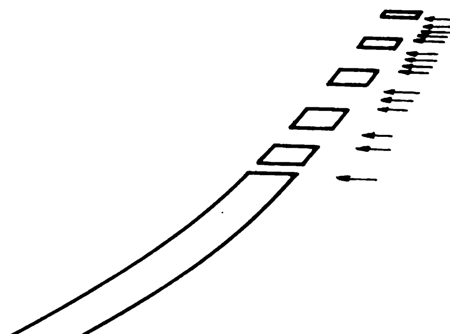


*Fig. 178 : Méthode « Iwata » utilisée sur les pavillons, sur les embouchures, destinée à réduire l'effet de bord et les effets d'ondes réfléchies.*

Des fentes, de plus en larges vers la fin du pavillon, vont permettre d'obtenir ce couplage progressif. Cette méthode est avantageuse pour les pavillons de genre Iwata, ou même hyperboliques. La chute de niveau acoustique, brutale en deçà de la fréquence de coupure de l'ensemble moteur/pavillon, peut présenter des inconvénients de bon raccordement avec les autres haut-parleurs. Les filtres doivent donc être soigneusement calculés et ajustés sur divers paramètres, en particulier celui de l'équilibre subjectif.

Comme on le voit, de nombreuses possibilités d'amélioration, tant pour la conception générale que pour les détails, existent. Les contraintes financières et commerciales vont malheureusement venir les limiter.

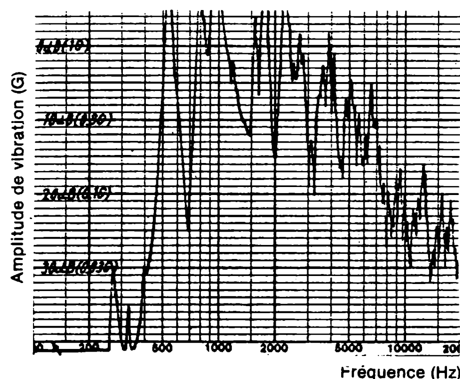
## Vibrations parasites

Sur de nombreux pavillons, la détérioration de la fidélité sonore est le plus souvent due à une mauvaise conception des moteurs ou des pavillons (voire des deux). Ainsi, certains effets de coloration prononcée, parfois très gênants, sont simplement la suite d'une résonance mécanique. On connait, sur les tables de lecture évoluées, les impératifs pour isoler mécaniquement le sillon et la pointe lectrice du reste. Dans un haut-parleur à pavillon, les variations de pression acoustique, dues au passage des ondes, sont telles, qu'elles peuvent mettre en vibration les parois du pavillon. En effet, le pavillon est souvent insuffisamment amorti (d'un point de vue mécanique). Lorsqu'il est réalisé en fonte de faible épaisseur, la vibration parasite des parois est telle que, des variations de pression à l'intérieur du pavillon vont se créer d'une manière transitoire. Celui-ci peut, en outre, rayonner directement (surface émissive non négligeable). La figure 179 révèle les différences de vibrations parasites captées sur les parois

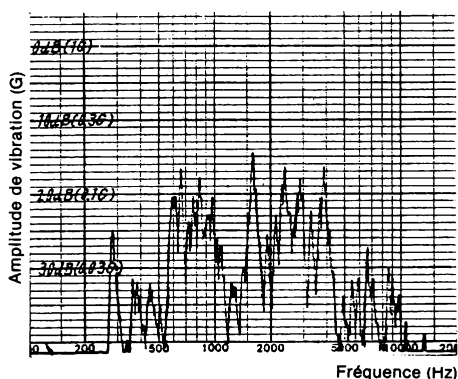
d'un pavillon non traité, et sur ce même pavillon, après traitement, consistant à amortir les parois extérieurement, par 20 mm de goudron mou (ne durcissant pas).

Ce phénomène est, d'ailleurs, également présent sur les enceintes acoustiques et sera observé plus loin.

Le « sablage » des pavillons est également un moyen très efficace et peu coûteux (si réalisé artisanalement).




Paroi de pavillon non traitée
(fonte d'acier peinte)




Paroi de pavillon traitée
(goudron de 1 cm d'épaisseur)

*Fig. 179 : Mesure des différences de vibrations parasites obtenues sur des pavillons au parois amorties mécaniquement ou non amorties. (D'après Musen to Jikken, Stereo Technic, 1978, Japon).*

Il a même été utilisé sur quelques grandes enceintes à parois doubles (modèles d'encoignures volumineux, etc.) et G.A. Briggs en fait souvent mention dans ses ouvrages. Toutes ces bonnes idées sont malheureusement peu appliquées, et ont presque été oubliées, car peu rentables du point de vue commercial. La figure 180 montre l'exemple de résultats obtenus par un pavillon d'origine japonaise, dont les parois doubles, sont sablées intérieurement.

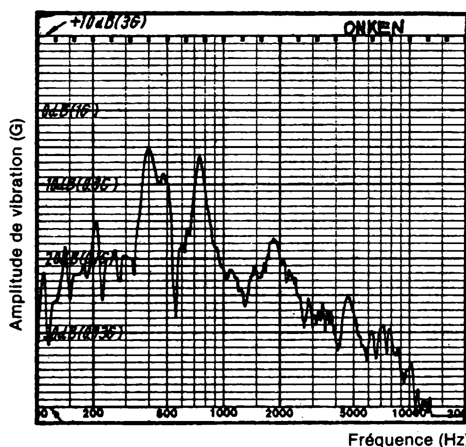



*Fig. 180 : Mesure de vibrations parasites sur un pavillon radial aux parois intérieurement sablées. Remarquer l'excellente efficacité de ce traitement, déjà vanté de nombreuses fois par G.A. Briggs dans ses ouvrages. (Stereo Technic, 1978, Japon).*

## La chambre de compression

Des technologies différentes ont pu être appliquées pour la chambre de compression (ou moteur). Ces variantes, assez nombreuses, sont décrites schématiquement sur la figure 181. Il est possible de partir de transducteurs d'impédance relativement basse (petit haut-parleur à membrane par exemple, adapté sur des pavillons à surface de gorge relativement grande (environ 10 à 13 cm de diamètre). La plupart des moteurs utilisent, cependant, des membranes de petit diamètre.

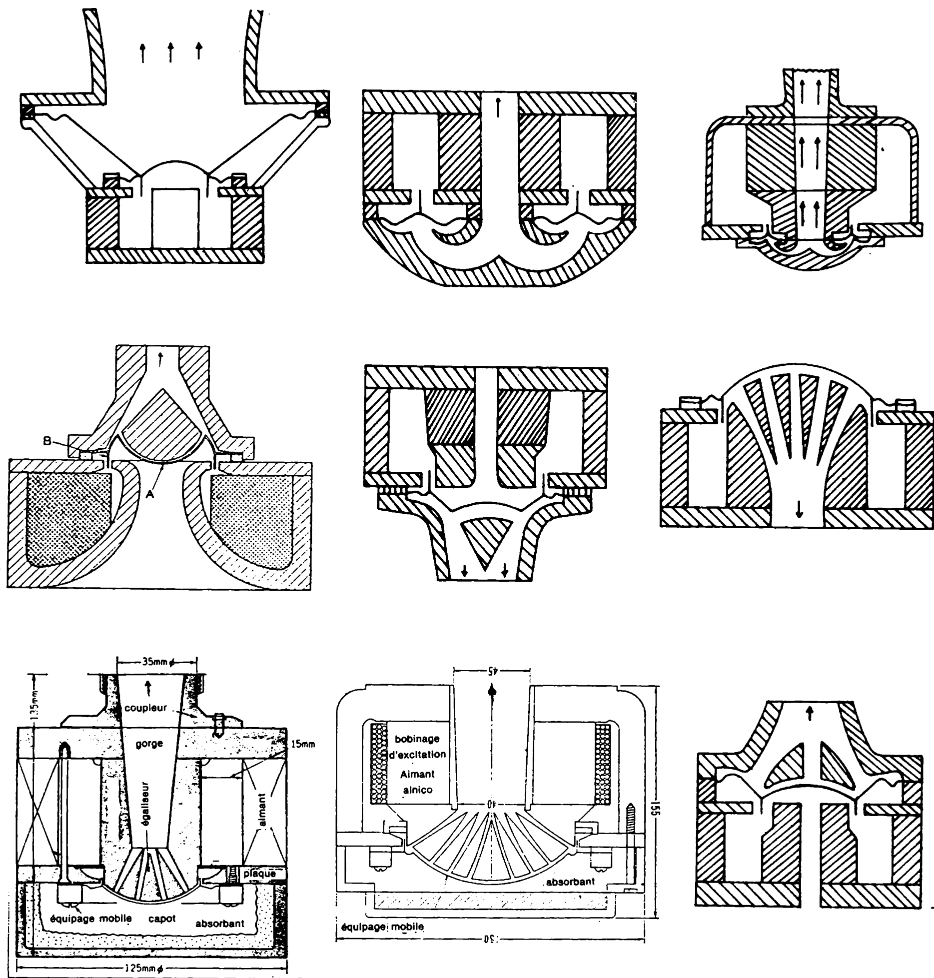



*Fig. 181 : Exemple de diverses chambres de compression.*

## a) La membrane

Le diamètre de cette membrane ne dépasse, en effet que très rarement 10 cm. Un circuit magnétique, particulièrement volumineux, sera donc nécessaire. Ces membranes sont le plus souvent réalisées en métal pressé (aluminium, duralumin, métaux légers et

rigides). Sur quelques modèles, il est parfois fait usage de tissu bakélisé. La bobine mobile peut se positionner d'un côté ou de l'autre de la membrane, en général en forme de dôme. Sur le moteur Western Electric, il est par contre fait usage d'un dôme dont la partie centrale est renversée, formant une partie concave. Il en sera question plus loin.

### b) La suspension

La suspension peut faire appel à plusieurs conceptions : gaufrée, tangentielle, plate. La suspension tangentielle est la plus utilisée. Son application sur la chambre de compression remonte à 1928 (moteur WE 555 W). Elle était autrefois utilisée sur les diaphragmes de phonographes. Cette idée de suspension tangentielle semble être due à RCA/Victor, chez qui les inventeurs Maxfield et Harrisson l'appliquèrent à partir des environs de 1918.

La suspension, continuation de la membrane, est souvent faite d'une seule pièce avec celle-ci. Elle est parfois rapportée par collage (suspension en mylar, en métal, en tissu traité etc.).

Afin de travailler sous une impédance plus élevée, la membrane est le plus souvent couplée à une pièce de phase, appelée « Equaliser ». La « chambre de compression », proprement dite est, en effet, la partie comprise entre cette pièce de phase et la membrane. C'est l'endroit où, lors du signal, les variations de pression sont les plus importantes.

### c) La pièce de phase

Cette pièce de phase est située à proximité immédiate de la membrane. Elle est percée de trous ou munie de fentes (soit radiales, soit concentriques) communiquant avec la gorge du pavillon. Elle joue un rôle très important pour le rendement et la courbe de réponse. Différentes variantes sont détaillées sur la figure 182. On peut noter que le système à fentes concentriques est le plus utilisé. Il existe aussi des systèmes où ces trous rappellent une pomme d'arrosoir (tels que ceux que proposèrent, dans le courant des années 50, Norman Crowhurst, de la firme anglaise Tannoy, sur les fameux haut-parleurs « Monitor Gold ». Une autre version, celle à fentes radiales, est également pratiquée et peut donner de bons résultats. Ce système de fentes radiales avait été utilisé avec succès sur les moteurs JBL « 275 » des ensembles « Baron », donc après 1950. Ces idées sont en fait bien antérieures. Récemment, les ingénieurs de la firme Altec ont recalculé et optimisé cette technologie pour les moteurs de la série « Tangerine ». Cette technique, évitant entre autre des résonances éventuelles et améliorant la réponse en phase, permet une transmission nettement améliorée des fréquences élevées, soit pratiquement une octave en plus. Pour ces nouveaux moteurs Altec à pièce de phase « Tangerine », la bande passante utile s'étend ainsi de 500 Hz à 22 kHz.

A cet endroit du moteur, les variations de pression sont très importantes. Il est nécessaire d'utiliser des matériaux de densité élevée et, si possible, acoustiquement inertes. Le plomb ou un mélange plomb-antimoine (dans un rapport 96 %/4 %) est une très bonne solution, quoique fragile (donc difficile à appliquer lors d'une fabrication en moyenne ou grande série). Les matières synthétiques sont parfois utilisées, car présentant l'avantage d'un prix de revient bas, compte tenu des finitions possibles, ne nécéssitant pas de retouches. Les matériaux traditionnels sont malgré tout préférables. Des expériences portant sur des moteurs identiques, où seules les pièces de phase différaient par la nature des matériaux, ont donné des résultats flagrants sur ce sujet : plus le matériau était de densité élevée et acoustiquement inerte et plus on obtenait de bons résultats, en particulier sur le plan subjectif.

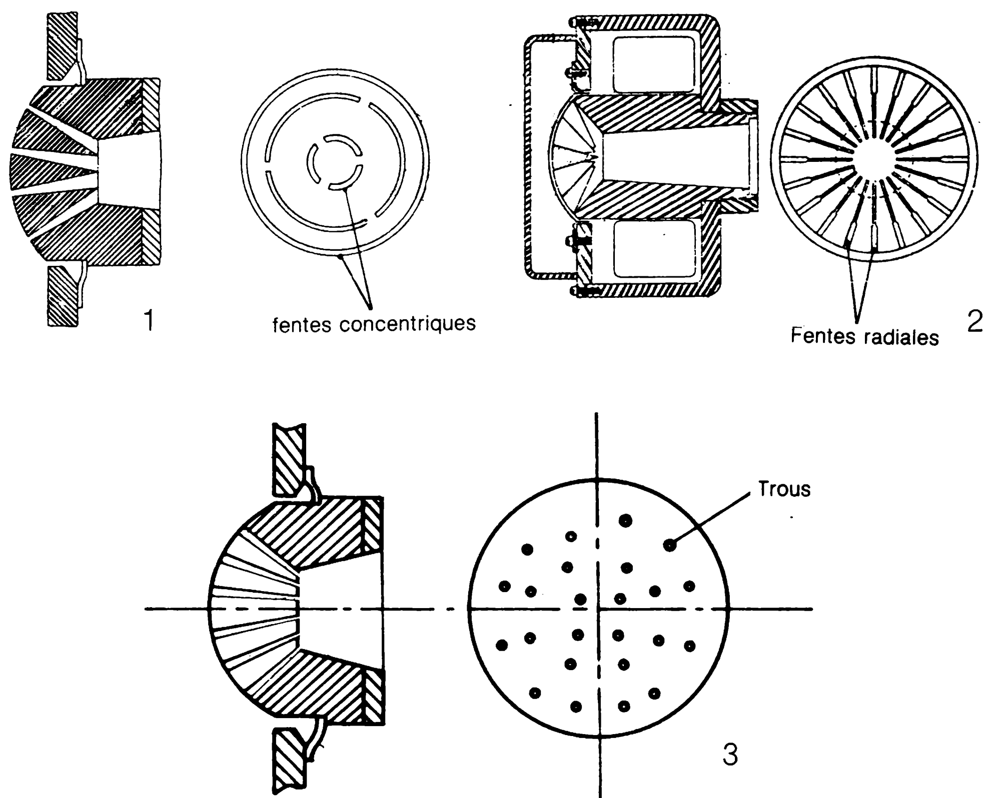



*Fig. 182 : Trois variantes connues des pièces de phase. La variante 1 est la plus courante. La variante 2 avait été utilisée autrefois par J.B.L. sur les moteurs 275 des séries « Baron », ainsi que sur quelques prototypes anglais. Elle fut réétudiée et optimisée plus récemment sur les séries Altec « Tangerine ».*

La finition et le degré de précision de cette pièce sont également des points très importants, surtout pour les applications haute fidelité. Sur certains transducteurs de ce genre, d'un standard de qualité très poussé, l'espace, compris entre la pièce de phase et la membrane, est réduit à l'épaisseur d'une feuille de papier à cigarette et demande un réglage minutieux (cas du célèbre tweeter japonais « Kato »). Il en est, bien sur, de même pour la membrane, qui est pressée en plusieurs fois (sept à huit opérations successives d'embossage). Elle peut donc présenter quelques inégalités de courbure, qui demanderont pour ces moteurs de haute qualité (par exemple Onken, Japon) un réglage et un polissage adaptés à chaque membrane. Ces difficultés sont moins fréquentes avec les membranes en aluminium, mais certains matériaux sont encore plus difficiles à presser (cas du titane recuit, utilisé sur les moteurs Onken), d'autant plus qu'une recuisson avant pressage peut encore en augmenter la rigidité.

### d) La bobine mobile

Elle est collée sur un support, en général une fine feuille de papier dur, ou de papier imprégné (à la résine époxy, etc.). Les très fortes variations de pression, malgré la très faible amplitude de déplacement, demandent un collage rigoureux. En général, la partie du support à coller est dentelée ou munie de parties prédécoupées, pliées et collées, par rabattement et collage du côté intérieur de la bobine

mobile . La figure 183, montre trois exemples courants. Ajoutons que le collage possède quelque influence sur les résultats vu que la masse de colle utilisée n'est pas toujours totalement négligeable et que cette colle peut avoir un certain effet de découplage mécanique, notamment sur impulsions brèves ou aux fréquences élevées.

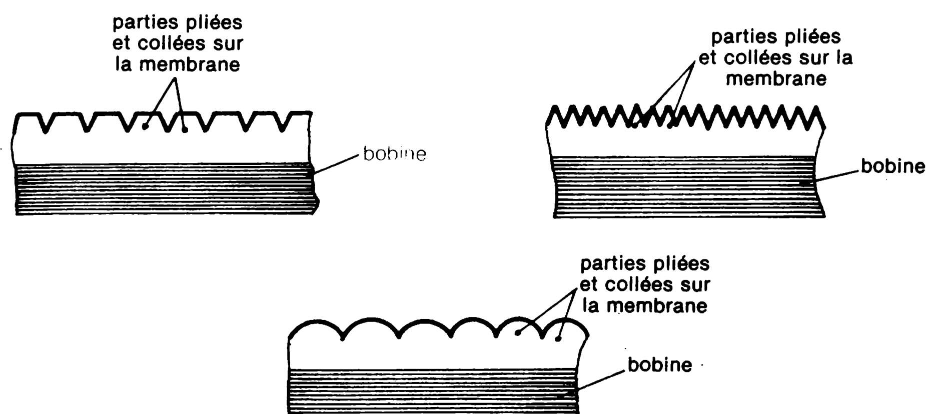



*Fig. 183 : Trois méthodes de découpe des supports de bobine mobile. Ces parties sont pliées et collées sur la membrane. Ces supports sont faits généralement de papier traité.*

### e) Les aimants

Ils sont le plus souvent placés à l'extérieur du circuit magnétique, d'où des fuites assez inévitables. Ces fuites sont très facilement décelables, de même que sur les haut-parleurs courants, et consistent à placer sur la périphérie de la pièce polaire dorsale une pièce en fer doux, qui se trouvera ainsi fortement attirée par les champs de fuite. Cette forte attraction n'est pas le signe que l'on a affaire à un aimant très puissant, mais plutôt que l'on se trouve en présence de fuites magnétiques. Les aimants sont très souvent de genre Ticonal, Alnico et autres variantes à base de cobalt, ce métal devenant de plus en plus rare depuis quelques années. Récemment, ceux-ci sont quelquefois remplacés par des aimants céramiques, bien que cet échange entraîne très généralement une perte de rendement et de qualité (le remplacement exigererait, pour des performances égales, des aimants ferrites ou céramiques au moins dix fois plus larges, comme l'expliquait Gayford. ce qui n'est presque jamais appliqué en pratique, d'où cette perte de qualité).

Le champ magnétique dans l'entrefer est souvent élevé ou même très élevé (plus de 15 000 Gauss ou 1,5 Tesla). Les avantages d'un champ très élevé avaient déjà été démontrés par Wente et Thuras ainsi que par Mac Lachlan (essais sur trains d'ondes, amortissement sur réponse transitoire).

Sur certains circuits magnétiques on trouve deux entrefers placés de part et d'autre de l'aimant périphérique. Un exemple connu est le fameux haut-parleur Tannoy, une version coaxiale à moteur unique, mais à double entrefer.

Quelques rares chambres de compression font appel à la technologie de l'aimant central. La pièce de phase et le début de la gorge demandant un perçage et un usinage du centre de cet aimant, et cette conception est assez délicate. Les haut-parleurs japonais « Ramsa », une filiale de la firme Matsushita en sont un exemple concret. Pour cette réalisation des aimants « Almax », faciles à travailler au tour, sont utilisés.

## f) Rendement

Il est en général élévé voire même très élevé. Il atteint assez facilement 30 et même 50 %. Ceci est dû, en grande partie, à l'adoption de la chambre de compression ainsi qu'à l'utilisation de la pièce de phase placée à proximité de la membrane. Cette question avait été traitée fort sérieusement par Hanna et Slépian, leurs travaux sur les pavillons restant encore très connus, de même que ceux de Wente et Thuras, datant de 1928. Comme indiqué plus haut, ce rendement se situe entre 20 et 80 %. En comparaison, celui des haut-parleurs électrodynamiques est de l'ordre de 1 à 10 %. Toutefois, pour des rendements très élevés, la réponse en niveau

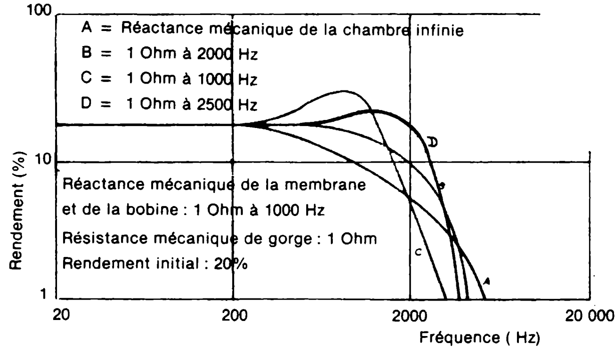



*Fig. 184 : Variation du rendement en fonction de la fréquence, pour diverses valeurs de réactance mécanique de la chambre de compression.*

chute aux fréquences élevées, à cause de la masse de l'équipage mobile. Quant à l'élasticité de l'air correspondant à la chambre de compression proprement dite, elle s'exprime par la formule :

$$E = \frac{V}{\varrho c^2 S m^2}$$

où E correspond à l'élasticité de l'air et où V représente le volume d'air de la chambre de compression. Ce volume diminue la réactance de l'équipage mobile aux fréquences élevées et améliore le rendement.

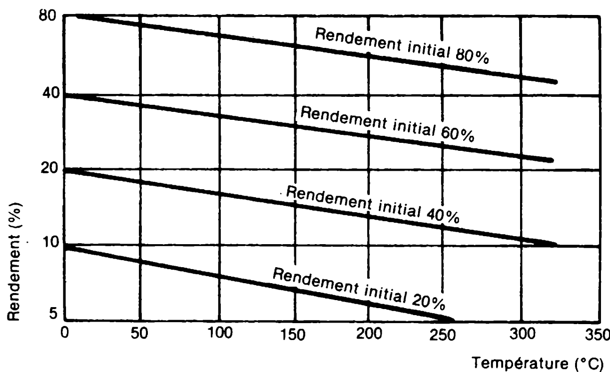



*Fig. 185 : Variation du rendement en fonction de la température de la bobine mobile, pour diverses valeurs du rendement initial.*

La figure 184 montre que l'on peut ajuster la réactance mécanique de ce volume d'air en expansion/compression.

Le type de fil utilisé (matériau, masse, type d'isolant) ainsi que la nature du collage et du support, des pièces polaires jouent aussi sur le rendement, vu l'effet de dissipation thermique qui a lieu dans la bobine. La figure 185, montre un exemple étudié par Wente et Thuras.

#### g) Cavité arrière

La chambre de compression émet des sons par sa face avant, mais également par sa face intérieure. Une seule des faces est utilisée et ceci demande une isolation acoustique, voire une absorption de l'onde arrière. En général, il s'agit d'un capot en fonte sur lequel sont fixées parfois les bornes de sorties. L'intérieur de ce capot est généralement recouvert d'un absorbant : feutre, laine de verre, etc. Quelques rares systèmes sont dits « équilibrés », c'est-à-dire utilisant une charge symétrique pour les deux faces. Un exemple est celui du pavillon Iwata, une sorte de pavillon double au milieu duquel se place la chambre de compression. La forme et le volume de la cavité antérieure influencent beaucoup les performances subjectives.

#### h) Localisation spatiale de l'image sonore

A propos du haut-parleur à pavillon, on se pose la question : où se situe sa surface émissive, réelle ou fictive ?

On peut supposer à tort que « l'image » sonore se positionne sur la bobine mobile ou sur la membrane. On peut encore penser que la localisation se fait au niveau de la « gorge » du pavillon, où tous les sons émis par la membrane sont réunis avant de se diriger vers le pavillon. Ce n'est pas plus exact.

Olson et H. Nakajima, célèbre acousticien japonais firent plusieurs constatations, en mesurant les variations de deux doubles rapports (rapport diamètre du travail en piston (pour une directivité uniforme)/diamètre de l'embouchure du pavillon sur rapport diamètre de l'embouchure du pavillon/longueur d'onde reproduite).

Ils constatèrent, comme sur les haut-parleurs électrodynamiques, un effet de déphasage lié au diamètre de la membrane. Il devint donc possible d'évaluer sur un pavillon, le diamètre et l'emplacement de cette « membrane » fictive. Ni au niveau de la gorge, ni à celui de l'embouchure, cette « image » se forme en fait à l'intérieur du pavillon, près de l'embouchure. Son diamètre est de 80 % celui de l'embouchure, soit 0,8 *ah* (*ah* étant le diamètre de l'embouchure du pavillon). Ceci n'est cependant valable que pour les fréquences basses (et les petits pavillons). Au dessus d'une certaine fréquence, on constate en effet un recul de l'image, plus ou moins prononcé suivant le type de pavillon. Ce recul est lié à la caractéristique de directivité.

Les figures 186 et 187 montrent le positionnement fictif de l'image sonore, ainsi que l'effet de recul de cette image, pour deux diamètres de pavillon (10 et 50 cm).

On peut donc affirmer qu'il est souhaitable de faire travailler le pavillon dans sa zone utilisable. Fort heureusement, certains pavillons, peu directifs, permettent de très bons compromis. La bande utilisable peut s'étendre de 400 Hz à 12 kHz par exemple (pavillons de médium). Par contre, une mauvaise conception ou une mauvaise utilisation dans un système à trois ou quatre voies pourra apporter des défauts. Parmi ceux-ci, bien connus pour le médium et l'aigu en particulier, un son « venant du fond du pavillon ».

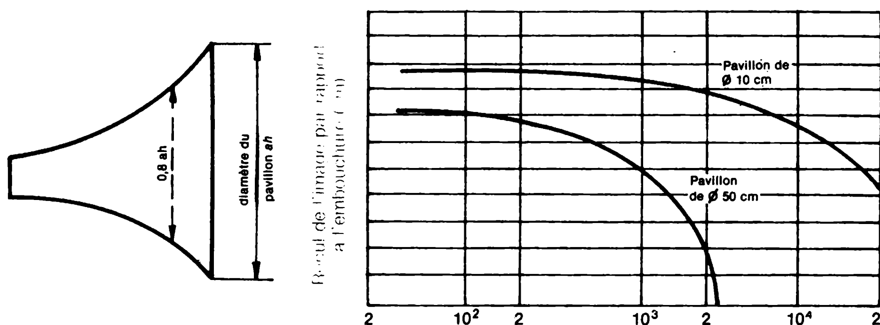



*Fig. 186 et 187 : Localisation subjective de la source émissive sur un pavillon et variation en profondeur de celle-ci, en fonction de la fréquence. La forme d'expansion du pavillon peut modifier cet effet subjectif.*

Il est d'autre part souhaitable de choisir une fréquence de coupure basse correspondant à deux fois, deux fois et demi la fréquence de coupure du pavillon.

## La chambre de compression Western Electric WE 555 W

Il semble important d'ouvrir un paragraphe sur une chambre de compression de qualité exceptionnelle. Les résultats, aboutissement des recherches, étaient tels qu'elles ont servi de base à de nombreuses chambres de compression réalisées ultérieurement. Cette chambre de compression fut étudiée vers 1926 et mise sur le marché en 1928. Ele était principalement destinée à la reproduction du son dans les salles de spectacles et des films parlants. Les auteurs de cette réalisation sont E.C. Wente et A.L. Thuras des laboratoires américains Bell Systems. Les premiers systèmes électroacoustiques destinés au cinéma parlant n'avaient que des performances très moyennes. La mise sur le marché de cet ensemble complet (depuis la cellule du projecteur jusqu'à l'enceinte acoustique) aux performances très poussées a été un succès mondial, sur plusieurs dizaines d'années. Ces systèmes portaient, par exemple, le nom de « Vitaphone » ou de « Movietone ». Les divers maillons composant le système de reproduction étaient tous remarquablement bien étudiés. Le rendement des haut-parleurs atteignait la valeur de 50 %. Malgré ce rendement très élevé, la puissance admissible en permanence était de l'ordre de 30 watts et la bande passante était très large puisque s'étendant de 60 à 8 000 Hz. Ceci représentait un progrès considérable par rapport aux haut-parleurs électrodynamiques de l'époque. Ces derniers atteignaient avec peine un rendement de 1 % et étaient souvent fragiles et peu linéaires.

Sur ce moteur 555 W l'ensemble membrane/bobine mobile/pièce de phase/-circuit magnétique était d'une conception et d'une avance technologique remarquables. E.C. Wente appliquait, pour la première fois, sur les membranes, la technique de la suspension dite « tangentielle ». L'origine de cette technologie remonte à Maxfield et Harrisson qui l'avaient utilisée auparavant sur les diaphragmes de phonographes « Victrola ». Cette suspension était si pratique, si performante et si robuste qu'elle se généralisa par la suite sur les chambres de compression. La technique du fil plat pour la bobine mobile était utilisée ici pour la première fois. Une plus grande rigidité et moins de risques de déformation (voile, gauche) par effet thermique en étaient les avantages. La bobine à fil plat, était, en fait, une invention due à L.N. Mercner et J.L. Mathison. Elle fut donc reprise par Wente et Thuras qui la perfectionnent afin qu'elle résiste à des températures de l'ordre de 150°C. Elle per-

mit d'obtenir des performances hors-pair, surtout pour la puissance maximum admissible en permanence. Le circuit magnétique était, lui aussi remarquablement bien étudié. La figure 188 montre en coupe la forme originale des pièces polaires. Le noyau était évasé et percé, afin d'éviter la résonance de cavité caractéristique, que l'on rencontre souvent sur les haut-parleurs électrodynamiques. Cet évasement de la cavité centrale arrière, de forme exponentielle, était amorti par un absorbant (laine fine à fibres serrées). La cavité arrière était, bien sûr, hermétique (c'est le cas très général). L'embouchure du dégagement était masquée par une plaque circulaire fixée sur l'ensemble par des vis. Cette forme très recherchée permettait de réduire à un strict minimum les fuites magnétiques éventuelles.

La partie membrane/pièce de phase était aussi remarquablement bien étudiée, C'était la première fois que l'on trouvait la fameuse « pièce de phase ». La figure 189 montre la vue en coupe de cette pièce très importante. On remarque la forme particulière de la membrane en forme de dôme, mais avec sa partie centrale de courbure inversée (dôme concave). Cette disposition place la bobine mobile du côté

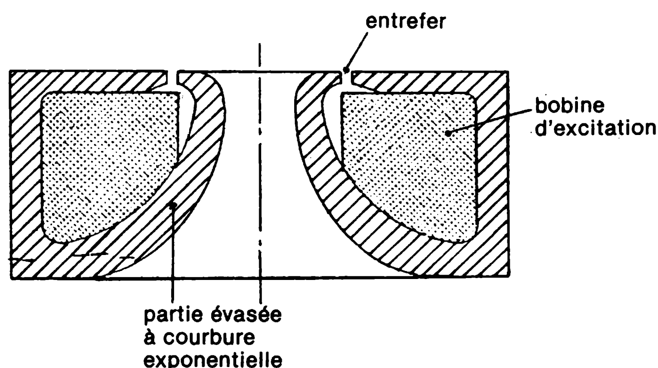



*Fig. 188 : Circuit magnétique du moteur Western Electric 555W. Remarquer la forme évasée et creuse du noyau. Cette forme curieuse est destinée à réduire les fuites magnétiques et évite la résonance de cavité. L'intérieur de la partie évasée est rempli d'absorbant (laine fine et tassée) et débouche sur un fond amovible. La tension appliquée à la bobine d'excitation était de 7 V. et la conception très avancée (forme du moteur, choix des matériaux) permettait d'obtenir dans l'entrefer un champ de 20 000 Gauss (2 Tesla), ce qui était exceptionnel pour l'époque.*

opposé à la gorge communiquant avec le pavillon. Cette méthode rend totalement hermétique la partie avant (communiquant avec le pavillon). Ceci est tout à fait souhaitable, car les variations de pression sont très importantes près de la membrane. La plupart des chambres de compression possèdent des membranes disposées d'une autre façon, c'est-à-dire avec la bobine mobile placée du côté du pavillon. Cette seconde méthode, la plus pratiquée à ce jour, car la plus simple, possède plusieurs désavantages. Le plus grave semble bien être le fait que l'entrefer va se trouver du côté du pavillon, à un endroit devant être bien hermétique. La fuite d'air dans le passage communiquant avec le pavillon peut provoquer des irrégularités (courbe de réponse) et certains constructeurs utilisent à cet effet une bague de centrage pouvant faire également office de bague d'étanchéité ou de bague de court-circuit. Autre défaut (lorsque la bobine mobile est placée du côté de la gorge) : le risque d'empoussiérage qui demande l'insertion d'une protection acoustiquement transparente (grillage très fin, tissus finement tressé).

Sur la chambre de compression 555W, la configuration de la membrane évite ce défaut courant. La partie retournée présente le maximum de rigi-

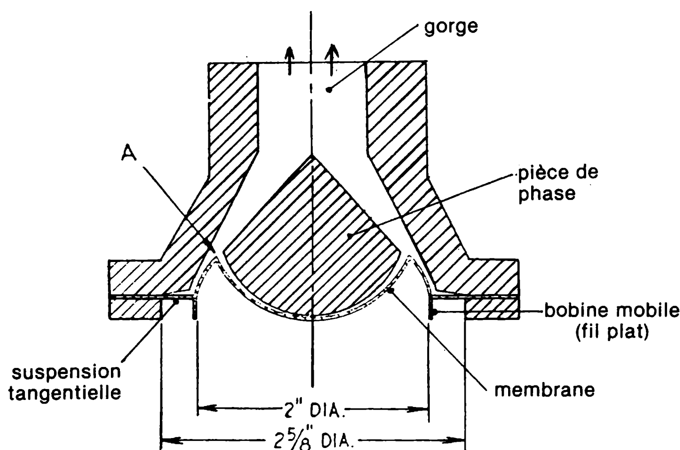



*Fig. 189 : Pièce de phase et membrane de la chambre de compression 555W.*
*- Masse de l'équipage mobile : 1 g.*
*- Surface effective du diaphragme : 28 cm²*
*- Résistance de la bobine mobile : 12,8 Ω*
*- Impédance de la bobine mobile : 16 Ω*
*- Longueur du fil de la bobine mobile : 760 cm*
*- Densité de flux dans l'entrefer : 20 000 Gauss (2 Tesla)*
*- Excitation : 7 Volts, 1,5 A ( 1,3A avec - 3dB de niveau)*
*- Résistance de la bobine d'excitation : 4,5 Ω*
*- Puissance admissible : 30 Watts.*
*- Bande passante : 100 - 6 000 Hz.*

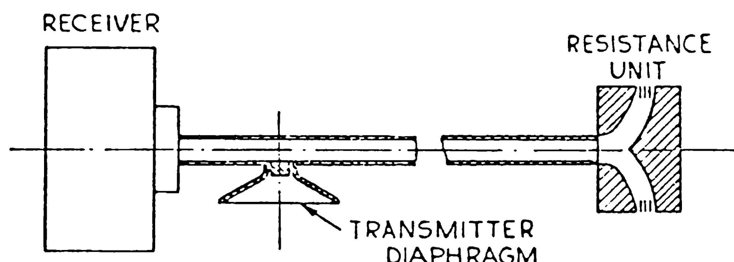
*Remarquer la forme réentrante du diaphragme, forme étudiée pour réduire l'effet de roulis, pour réduire le taux de distorsion par harmonique 3 et pour augmenter la rigidité.*

*En effet, cette théorie de Wente et Thuras à propos de la distorsion par harmonique 3 a été vérifiée en 1955 par le japonais M. Yoshimura.*

dité au point A (figure 189), à l'endroit où les variations de pression sont les plus grandes. Selon Wente et Thuras, cette forme possédait un autre avantage : celui de supprimer, en grande partie, la distorsion par harmonique 3, ce que semblent effectivement confirmer les résultats de mesures. On sait combien est gênante à l'écoute une telle forme de distorsion, même par rapport à une éventuelle irrégularité de la courbe de réponse. Selon Wente et Thuras, la partie comprise entre la bobine mobile et le repliement serait à l'origine de cette suppression d'harmonique 3. Toujours est-il que cette forme apporte une plus grande rigidité. Autre point curieux (que l'on peut retrouver par le calcul) : la partie concave de la membrane face à face avec l'égaliseur de phase correspond très exactement à la surface que couvrirait la bobine mobile. Troisième point intéressant : l'écartement entre l'égaliseur de phase et la membrane n'est pas constant le long du rayon de celle-ci. La figure 189 montre, en effet, que l'entrefer est plus resserré au centre et s'élargit peu à peu. D'autre part, on constate qu'en coupant en fines tranches longitudinales la partie située entre le point A et la gorge, on obtient des surfaces pratiquement identiques. Ces diverses précautions étaient destinées à éviter la formation d'ondes stationnaires. Le but recherché était obtenu : un effet de pincement de l'air et d'augmentation de la vitesse de propagation de l'onde acoustique. Cette idée se retrouve d'ailleurs sur le transducteur d'Oscar

Heil étudié précédemment. Toujours selon Wente et Thuras, cette forme de membrane ainsi que l'écartement variable réduiraient notablement l'effet de balancement du diaphragme, ce qui fait augmenter, comme on le sait, le taux de distorsion par harmonique 3.

Les réflexions de Wente et Thuras sur ce sujet semblent donc tout à fait exactes. Cette disposition permet effectivement de bien contrôler les déformations transitoires de la membrane et d'effectuer, grâce à l'égaliseur de phase, un bon « mélange », avant que le tout ne soit envoyé vers la gorge du pavillon. Un imparfait mélange résulte, le plus souvent, de défauts de directivité ou de distorsion (déformation des fronts d'ondes à lIntérieur du pavillon). On ne saurait insister sur ce point très important d'un « mixage » parfaitement homogène à faire avant de diriger les sons vers la chambre de compression. Dans les calculs, les notions de front



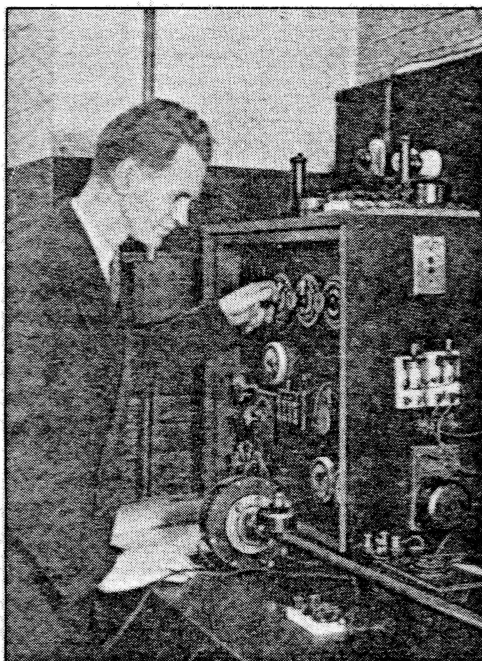



*Fig. 190 : Méthode de mesure étudiée par Théodore Osmer, chercheur qui participa activement à la réalisation du moteur 555 W. La gorge de la chambre de compression était reliée à un tube de 30 m. de long, débouchant sur un absorbant acoustique. Près du moteur se trouvait une petite fente longitudinale sur le tube. Derrière cette fente était placé un capteur microphonique. Ce capteur était un microphone à condensateur préétalonné. Cette méthode inventée par Osmer permettait de déterminer le rendement avec précision.*

d'ondes sphériques ou plans, d'effets tourbillonnaires nuls, de pression identique en tout point d'un front d'onde donné sont essentielles. Elles impliquent l'exigence de ce « mixage parfait ». que seul peut procurer un couple membrane/pièce de phase parfaitement étudié.

Le moteur Western Electric 555 W était alimenté sous 7 Volts, 1,5A, ce qui procurait dans l'entrefer le champ très généreux, et exceptionnel pour l'époque, de 20 000 Gauss (2 Tesla). Ceci était possible grâce à la configuration des pièces polaires et au choix des métaux utilisés pour le circuit magnétique (ce champ passa à une valeur un peu plus faible par la suite, pour une question de tenue thermique). Les plaques de champ, très perméables étaient réalisées à partir dUn alliage à base de cobalt, nickel et autres matériaux.

Selon Théodore Osmer, qui participa activement à l'élaboration de ce transducteur, en particulier dans le domaine de la mesure, il était possible de faire passer la valeur de ce champ à 22 000 Gauss (2,2 Tesla), en suralimentant le bobinage d'excitation. Théodore Osmer travaillait avec Wente et Thuras dans les laboratoires de la Bell Systems. Il avait d'ailleurs inventé une méthode de mesure du rendement des chambres de compression. La figure 190 montre ce chercheur au travail. Tous ces travaux avaient été publiés à plusieurs reprises dans le journal de la Bell Systems, dont un article majeur datant du 28 Mars 1928.

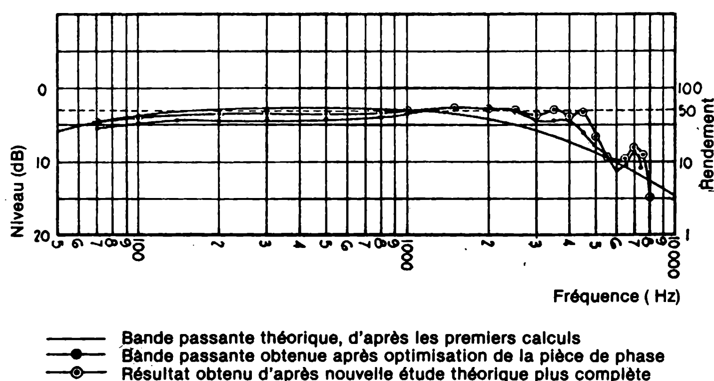



*Fig. 191 : Bande passante du moteur 555W. Remarquer l'exceptionnelle linéarité (pour un transducteur datant de 1928) ainsi que le rendement atteignant 50 %. Sur les modèles ultérieurs la bande passante fut élargie à 8 kHz, ce qui ramena le rendement à environ 30 %. En 1929, ce moteur était vendu au prix de 37,60 dollars, un prix relativement élevé.*

La bande passante obtenue est indiquée sur la figure 191. Couplée au pavillon 15A, la courbe de réponse était excellente et légèrement montante, (figure 192), signe d'un bon équilibre sonore subjectif (lorsque le système se trouve dans une situation de travail réelle). Les figures 193, 194 et 195 montrent des photos du fameux moteur 555 W, ainsi que les pavillons Western Electric KS 6368 et WE 15B.

Très longtemps, ce système fut utilisé dans les salles de spectacle à cause de sa robustesse et ses performances étonnantes. Il était aussi le plus onéreux des systèmes de sonorisation. A ce propos, on peut encore retrouver dans les catalogues Altec des membranes de remplacement de référence 20203A, pour ce moteur 555W. Malgré une bande passante

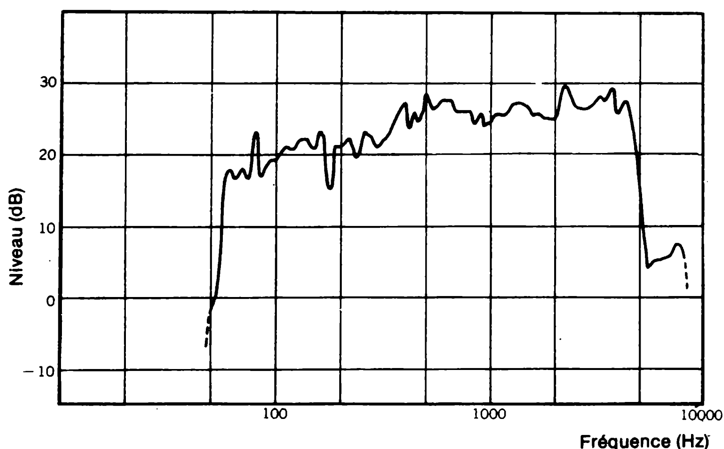
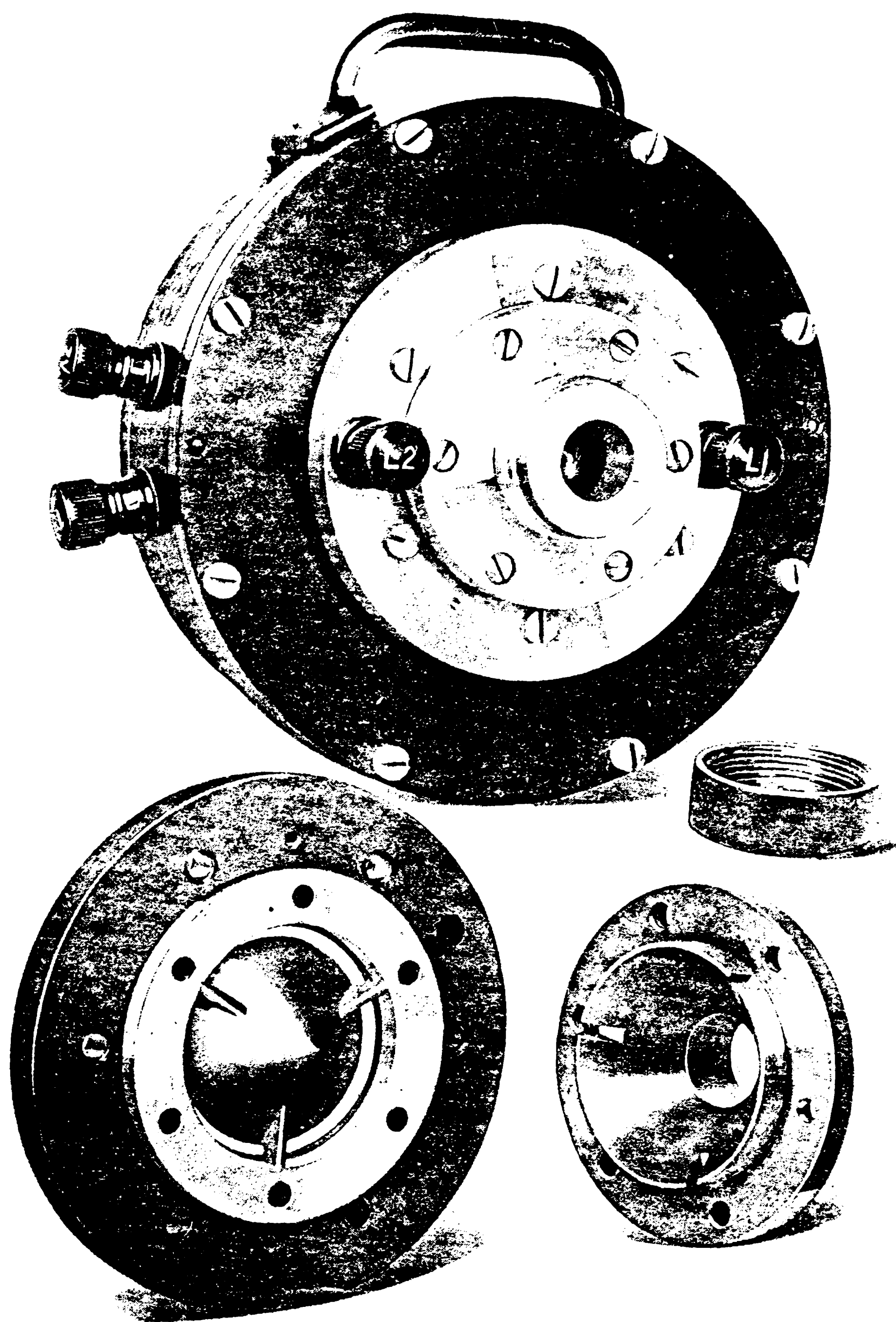


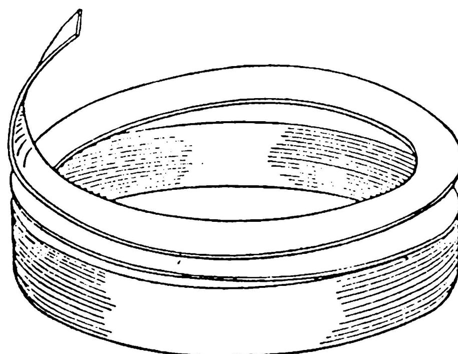

*Fig. 192 : Courbe de réponse du moteur 555W associé au pavillon replié WE 15A.*

réduite, ce moteur possédait un degré de définition du son étonnant. Il était possible d'autre part de lui adjoindre un tweeter (WE 297A) et un moteur de bas-médium (WE 294A), un modèle imposant par sa taille. Wente et Thuras avaient également étudié un moteur pour la reproduction du grave, dont l'ensemble était donné pour une coupure de 30 Hz. Malheureusement, le prix de revient, trop élevé, empêcha ce moteur exceptionnel de voir le jour.

Il semble cependant, d'après les documents de l'époque, réunis à ce sujet, que ces chercheurs avaient bel et bien réalisé, à titre expérimental. au moins quatre de ces systèmes à 4 voies, couvrant ainsi, malgré la date de 1928, une bande passante de 30 Hz à 18 000 Hz.

Selon ces chercheurs, le rendement se situait entre 30 et 50 % pour ces moteurs. Il permettait ainsi un respect pratiquement parfait de la dynamique, comme le montre la figure 196. Sur cette figure, on voit qu'une puissance de 3 watts, admise à la bobine mobile, se traduit par un niveau acoustique d'environ 110 dB à 1 m. La caractéristique de transfert puissance admise/niveau acoustique était pratiquement linéaire, ce qui n'est pas le cas des récents hauts parleurs à très bas rendement (genre dôme mou utilisé en tweeter par exemple). Pour ces derniers, on remarque qu'une tentative de compensation de la perte de rendement par un amplificateur plus puissant n'est que partielle, car on constatera une saturation acoustique se manifestant rapidement. Cette caractéristique de transfert est réalisée à partir de signaux sinusoïdaux et non à partir de signaux transitoires, ce qui accentue encore cette différence. Cette courbe explique largement le pourquoi d'une telle définition sonore et l'impression subjective que ce moteur de médium « monte » très haut dans l'aigu. C'est très certainement en raison de ces nombreux perfectionnements, alliant la théorie au détail pratique, que ce moteur fut si apprécié et depuis, copié et réétudié de nombreuses fois. Il était si bien étudié à cette époque lointaine de 1928 que, plus tard, c'est-à-dire vers les années 1940, 1976 et 1978, de nombreuses études réalisées sur ordinateurs ont donné très souvent des résultats de meilleurs compromis (dimensions, masses, souplesse, diamètre optimum, volume etc.) étonnamment proches du moteur 555W. Rien qu'au niveau de la suspension tangentielle, de la bobine réalisée sur fil plat ou de la pièce de


L2



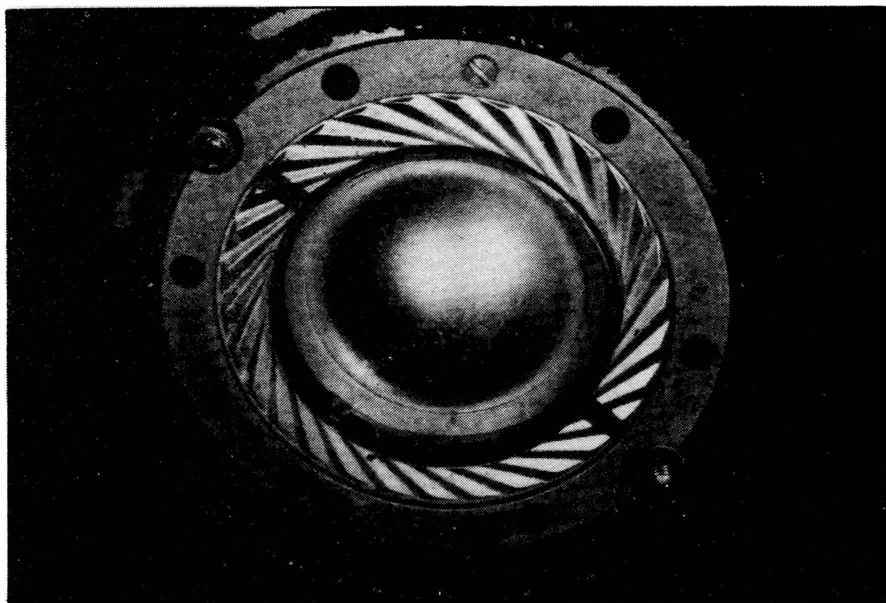


*Fig. 193 : Membrane du moteur 555W, vue du côté bobine mobile. Le dessin annexe montre schématiquement l'aspect de la bobine utilisant un fil plat. Pour la première fois, sur ces transducteurs, était utilisé l'égaliseur de phase, la suspension tangentielle et le fil plat pour la bobine mobile, trois innovations que l'on retrouve encore sur les moteurs actuels.*

phase, l'avance de Western Electric reste encore curieusement présente sur la grande majorité des chambres de compression actuelles. Ajoutons encore, à propos de ce moteur, que les bornes de fixation des sorties (signal, excitation) étaient de type à « piston ». Cette borne à piston travaille d'une façon idéale : en serrant la couronne molletée, un piston intérieur descend dans une cavité dans laquelle on introduit le fil. Ceci permet un serrage du fil sur une grande surface (faible résistance de contact) sans pour autant risquer de le couper par friction. Ce type de borne, inventé également par Western Electric est donc une invention américaine que l'on retrouve d'ailleurs sur les haut-parleurs Altec ou J.B.L. et plus récemment sur quelques produits japonais (Pioneer, Coral, Fostex, etc.).

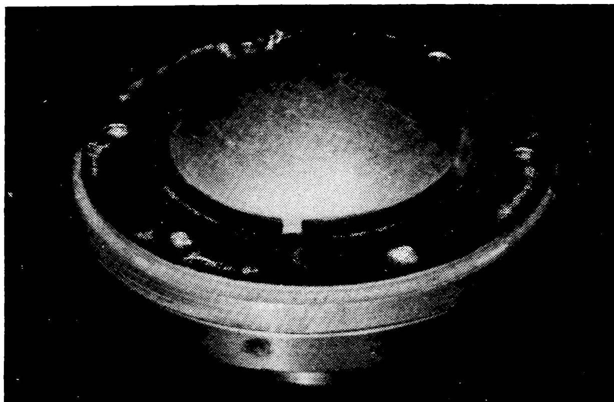
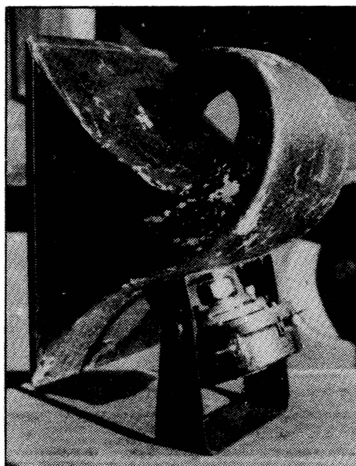


*Fig. 194 : Pièce de phase. La partie en portion de sphère se place face à la membrane. Sur le pourtour on remarque les fentes circulaires débouchant sur la gorge du moteur.*



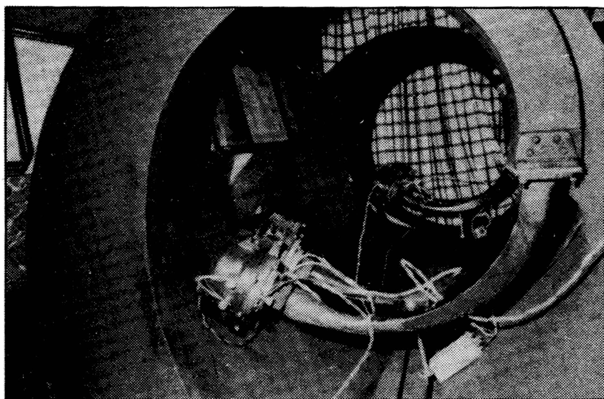


*Fig. 195 : Pavillons 15B et KS 6368. Le modèle 15B différait du modèle 15A par une gorge double menant à deux moteurs par pavillon. Quant au modèle 6368A, c'était un petit pavillon replié, dont une partie de la gorge traversait l'embouchure.*

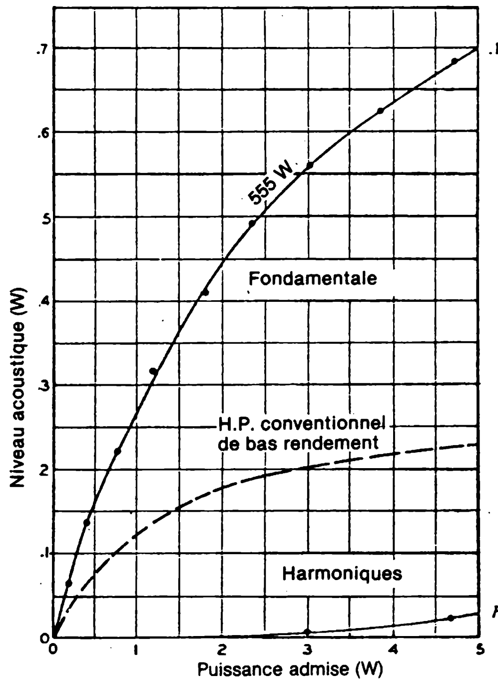



*Fig. 196 : Graphique représentant la variation du niveau acoustique en fonction de la puissance admise. Jusqu'à 3 Watts le transfert est particulièrement linéaire et la caractéristique de distorsion excellente. En comparaison, il a été représenté un haut-parleur à dôme de bas rendement, utilisant une membrane souple, pour lequel on note la saturation rapide du niveau acoustique (effet de compression sonore).*

Ainsi, sans ces inventeurs souvent peu connus que sont Wente et Thuras, il est fort possible d'imaginer que le haut-parleur aurait pu rester une pièce de musée, un système de transduction oublié, à l'image de quelques principes décrits au début de ce livre.

## Avenir du haut-parleur à pavillon

L'avenir du haut-parleur à pavillon semble certain. Bien qu'imparfait et comportant malgré tout quelques défauts indélébiles, inhérents à son principe, le haut-parleur à pavillon possède de très nombreuses qualités qui font presque oublier ses quelques défauts.

Ses avantages décisifs d'un rendement très élevé, d'une excellente robustesse, d'une grande fiabilité et d'une facilité d'entretien exemplaire (possibilité de changer l'équipage mobile rapidement, ce qui n'est pas le cas de la majorité des transducteurs) en ont fait un transducteur principalement utilisé dans le domaine professionnel. Parmi ses applications, le pavillon possède le très curieux avantage de « porter loin » les sons, un phénomène reconnu depuis fort longtemps. En conséquence, l'application (« Public Address »), (sonorisation en français) reste une des principales. C'est la politique adoptée par la firme Altec, l'une des plus anciennes firmes américaines de haut-parleurs. Cependant, il est tout à fait possible

d'étudier ces transducteurs pour une application en haute fidélité, malgré les présomptions de certains, persuadés que ces haut-parleurs risquent fortement de « parler du nez » ou d'émettre des sons de « porte-voix ». Chaque transducteur possède des défauts, malheureusement beaucoup plus faciles à créer qu'à supprimer : le son de « papier », de « carton », de « matière plastique » d'une membrane de haut-parleur électro-dynamique, le son de « mylar » d'un grand électrostatique, le son de « boîte » d'une enceinte acoustique. Si ces défauts, inhérents à chacun de ces principes, existent, chacun de ceux-ci possède aussi des qualités qu'il faut savoir valoriser du mieux que l'on peut. De même, il faut savoir maîtriser leurs principaux défauts, voire même les supprimer en très grande partie : c'est ainsi que devrait être conçu tout bon haut-parleur, quel qu'en soit son principe, et c'est le cas de bien d'autres technologies, pourtant loin d'être parfaites.

En haute fidélité, les précurseurs dans ce domaine sont, mis à part Western Electric, les firmes Altec, Jensen, Klipsch, J.B.L., Tannoy, Vitavox, Electro-Voice, et quelques autres. De nombreux constructeurs ont dû s'inspirer plus ou moins des moteurs Western Electric, ne serait-ce qu'au niveau

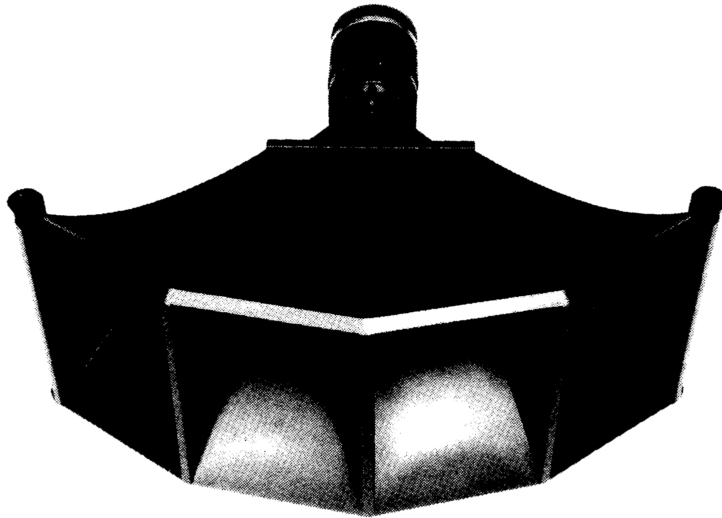


*Fig. 197 : Pavillon exponentiel sectoriel de marque Onken (Japon), utilisant des parois intérieurement sablées. Ce pavillon s'associe au moteur de même marque (pavillon SC 500 Wood et moteur OS-500MT)*

de la suspension tangentielle ou de l'égaliseur de phase. Parmi quelques modèles méritant vraiment le sigle « haute-fidélité » ou même « très haute-fidélité », on peut retenir le haut-parleur japonais « Kato ». Ces séries Kato, du nom de son créateur M. Kato, réalisées pour la plupart entre 1948 et 1960, ont des performances pour le moins étonnantes. L'ingénieur Kato, un chercheur puriste en hi-fi, très difficile avec lui-même, possédait le gros avantage d'être spécialisé, avant même de se pencher sérieusement dans la fabrication de ses fabuleux tweeters, dans la construction de tours de très haute précision. Il savait jongler, avec la plus grande aisance, avec des tolérances de fabrication extrêmement faibles.

Au cours de ses travaux, d'où sortirent un grand nombre de prototypes, il fut ainsi mis au point une série de tweeters dont les performances étaient, et restent, même à l'heure actuelle insurpassées (ceci malgré les dires de certains concurrents). L'ingénieur Kato, qui était aussi passionné par la fabrication d'appareils photo (châssis, pièces diverses) cachait d'ailleurs farouchement son « know-how » et ses fameux tweeters étaient indémontables. Une tentative de démontage demandait la destruction des scellés posés sur les vis de serrage et avait le fâcheux inconvénient de déchirer la membrane. Seul Kato connaissait la bonne recette pour le démontage et la réparation éventuelle (car ses tweeters étaient relativement fragiles aux chocs électriques). Toujours est-il que, malgré des membranes relativement épaisses (21 microns) et des diamètres courants de bobines mobiles, il dépassait largement ce que l'on arrive à atteindre avec peine sur des membranes beaucoup plus fines et des matériaux beaucoup plus intéressants, comme le titane par exemple. Seules les firmes Goto et Onken, élèves de « l'école Kato » réussirent, après de longues années d'efforts et de nombreuses déceptions, à approcher les performances des meilleurs modèles Kato (vu que, comme pour les Stradivarius, il en

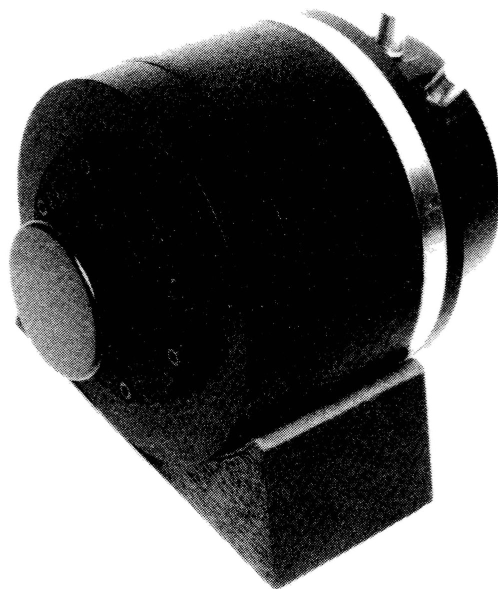


*Fig. 198 : Moteur Onken, de référence OS-455T. C'est un modèle de réalisation artisanale, particulièrement recherché au Japon.*

existait aussi de relativement mauvais). Les meilleurs tweeters Kato, les séries « Mushroom-Bell », remaniées par la suite par Onken, petit artisan japonais, prirent sous cette autre marque le surnom de « Kato-Onken », en raison de qualités (et d'ésthétique) très ressemblantes. Pour apporter quelques amusants détails sur ce mystérieux personnage qu'est M. Kato (lequel est encore vivant à l'heure où est écrit ce livre), citons par exemple qu'un éventuel interview, demandé par quelques revues techniques très sérieuses, était dans presque tous les cas un échec total : l'interview était accordé avec maintes difficultés, et M. Kato avait le fâcheux défaut de détourner chaque fois les diverses questions techniques qui lui étaient

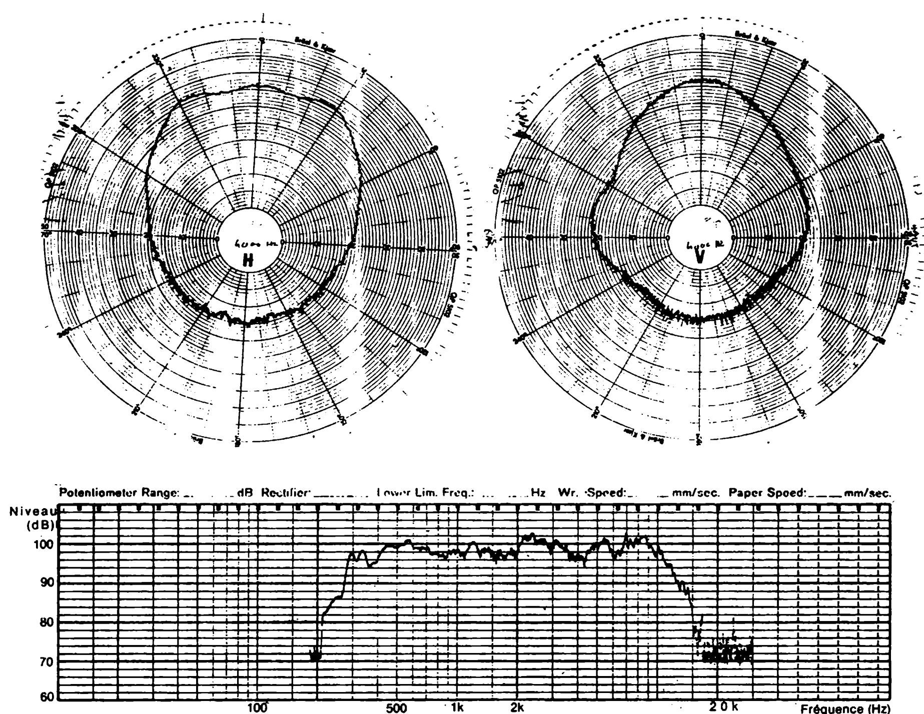



*Fig. 199 et 200 : Caractéristique de directivité (horizontale et verticale), à 4 kHz, de l'ensemble Onken OS-500 MT / SC-500 Wood. Courbe amplitude / fréquence de ce même ensemble. Les résultats sont exceptionnels.*

posées, de les détourner au point que l'interview concernait finalement soit les mécaniques d'appareils photo ou les moteurs de voitures allemandes. Toujours est-il que ce secret de fabrication semble jalousement gardé et que les éventuels démontages par les experts n'ont pu permettre d'aboutir à des performances semblables. Ceci montre, pour parler plus sérieusement, qu'en matière de haute fidélité, le haut-parleur à pavillon peut apporter des résultats que l'on peut qualifier sans peur d' « insurpassables ». Ils demandent cependant un travail considérable, ce qui est bien sur le cas d'autres transducteurs que l'on désire optimiser au mieux. Sur ce point, les plus petits détails de ces moteurs semblaient minutieusement étudiés. Pour certaines séries de tweeters, M. Kato était, par exemple, incapable d'obtenir un résultat recherché pour une impédance prédéterminée, et l'éventuel client client devait se contenter de valeurs d'impédance apparamment fantaisistes de 6,4 Ω ou de 11,2 Ω.

Mais les prix d'or auxquels se disputent encore actuellement les quelques centaines de meilleurs modèles Kato, éparpillés sur le Japon, réalisés pour la plupart avant 1960, montrent, par les performances, qu'il ne s'agit pas de snobisme, mais bien d'une avance technique exceptionnelle et d'une grande maîtrise dans la technique du haut-parleur à pavillon. Bien que les séries Kato ont su garder leur prestige, ceci bien après que leur fabrication ait été arrêtée, les haut-parleurs Onken ont su relever le défi « Kato »

Appréciés des audiophiles japonais, ils permettent aussi d'accéder à des performances tout à fait remarquables, ceci sans que des critères de faible directivité ou

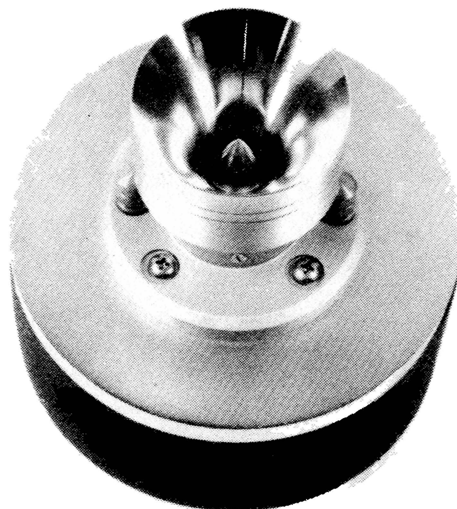


*Fig. 201 : Tweeter Onken OS-5000T (modèle 1968)*

de grande linéarité de courbe de réponse aient spécialement été recherchés. Les figures 197 et 198 montrent ces modèles, les figures 199 et 200 les résultats obtenus par ces derniers. Bien entendu, d'autres transducteurs auraient pu être choisis, mais le choix s'est porté ici sur des produits d'exception et de fabrication artisanale. Plusieurs autres exemples, concernant cette fois des transducteurs commercialisés couramment, seront trouvés sur les figures 201, 202, 203 (Kato,Onken) et 204 à 207

Ainsi, malgré l'appréhension de certains devant l'utilisation de tels transducteurs en haute fidélité, il est effectivement possible d'obtenir de très bons résultats. Au Japon, un pays ou la haute fidélité est un domaine très vaste (et une grande indus-



*Fig. 202 : Haut-parleur de médium-aigu Kato (Japon) réalisé vers 1955.*

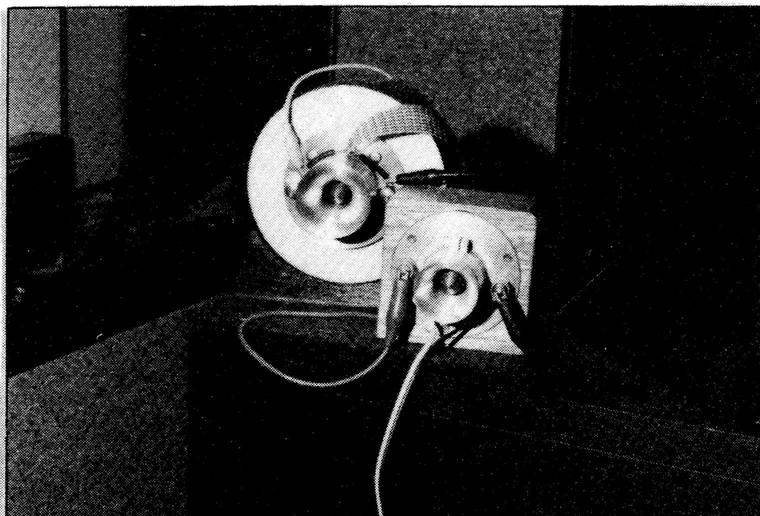


*Fig. 203 : Tweeters Onken (à gauche) et Kato (à droite). De fabrication artisanale, ils sont très réputés pour leurs qualités. Pour chacun d'eux le rendement dépasse 108 dB/m/W.*

trie), les recherches et les expériences dans cette voie sont très nombreuses et les exemples de chaines réalisées à 100 % à partir de pavillons sont très nombreuses. De tels systèmes, particulièrement onéreux et demandant même parfois la mise en place du pavillon de grave avant la construction de l'auditorium ou de la maison, sont malgré tout difficiles à bien mettre au point. Plus de 500 de ces imposants systèmes pourraient être cités, rien qu'au Japon et quelques uns d'entre eux pourraient être cités comme étant d'une optimisation exemplaire. Le rendement peut être tel qu'une puissance de 0,8 Watt peut s'avérer largement suffisante pour les

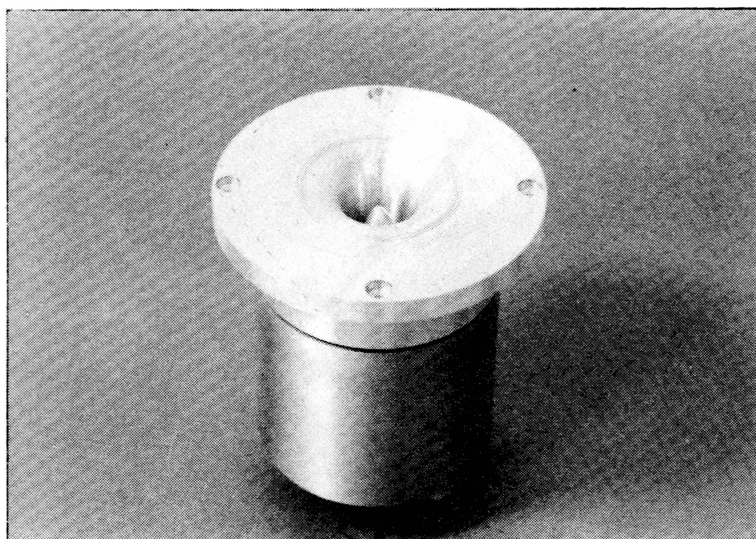


*Fig. 204 : Tweeter Hitachi (Japon), modèle H 35H, étudié en 1976.*

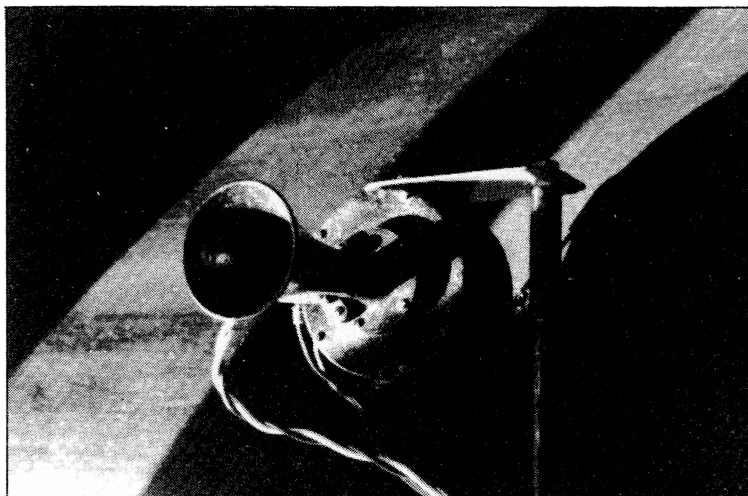


*Fig. 205 : Tweeter Western Electric WE597A. Il était doté de nombreux perfectionnements malgré son apparition vers les années 30. Ses résultats étaient étonnants. De nombreux tweeters se sont inspirés de ce modèle.*

amplificateurs, soit par exemple le cas d'un amateur japonais très connu depuis longue date, M. Kei Ikéda.

Pour ces systèmes utilisant à 100 % le principe du pavillon, le pavillon de grave est soit placé sous le plancher, soit encastré dans les murs latéraux ou encore dans le plafond. Les figures 208 et 208 bis montrent un exemple aux performances exceptionnelles, une réalisation de M. Tamaru, un audiophile chevronné. Sur un tel système, le rendement dépasse 100 dB/m/W et la fréquence de coupure se situe vers 20 Hz.

Le calcul théorique est très important pour l'optimisation des performances d'un haut-parleur à pavillon. Cependant, le côté pratique de la mise au point finale est lui

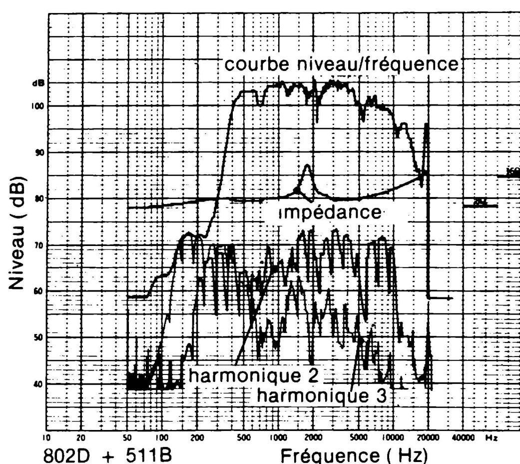



*Fig. 206 : Chambre de compression Altec, modèle 802-8D. Courbe amplitude / fréquence, courbe d'impédance et de distorsion par harmoniques.*

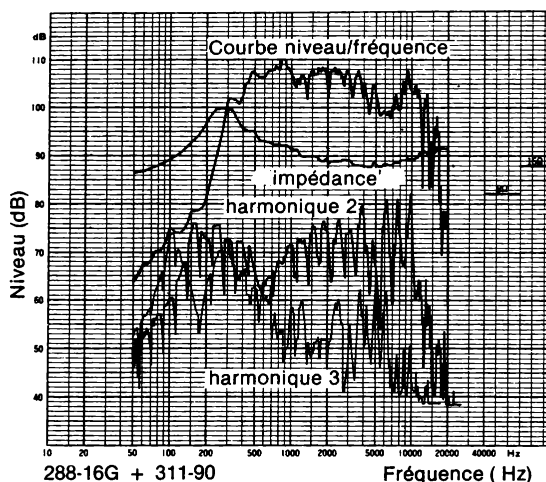



*Fig. 207 : Chambre de compression Altec, modèle 288-16G. Courbe amplitude / fréquence, courbe d'impédance et de distorsion par harmoniques.*

aussi très important. Les meilleurs d'entre eux sont le plus souvent originaires de vieux modèles eux-mêmes optimisés au cours de plusieurs dizaines d'années. C'est le cas des moteurs « London Western, Westrex » de référence 2080, 2090, 2091, des modèles destinés aux salles de spectacles mais qui restent néanmoins basés sur les vieux moteurs 555W. On voit ici que l'empirisme, la longue expérience basée sur des bases théoriques solides et originales permet, à force de patience d'obtenir un résultat proche de l'idéal. Ceci montre aussi que l'on ne peut s'appuyer sur les théories seules, aussi solides qu'elles soient. Pour la reproduction des sons graves, par exemple, il a été reconnu qu'un pavillon très long était nettement défavorable à une bonne réponse transitoire et, apportait un effet de traînage prononcé. Le meilleur compromis était en fait un pavillon bien plus court, chargé par une surface de gorge relativement grande (cas du pavillon Tamaru). On voit que le tout est une question de compromis pour lequel l'écoute finale sera le seul juge dans bien des cas. La perfection touche aussi des détails d'apparence pourtant très secondaire : vibrations parasites, matériaux utilisés, technique de pressage de la membrane, collage des pièces composant l'équipage mobile. Concernant entre autre la finition interne du pavillon, il a été également démontré que, contrairement à ce que l'on supposait, des surfaces particulièrement lisses n'étaient pas l'idéal. Selon les recherches de M. Iwata sur des matériaux d'origine suédoise, possédant des caractéristiques de friction extrêmement faibles, permettant par exemple à une pièce de glisser sur une autre plusieurs mètres, malgré la faiblesse de la poussée (matériaux anti-friction), ce chercheur à démontré que cet avantage apparent de friction presque nulle se trouvait gravement entravé par des effets tourbillonnaires prononcés et très difficiles à maîtriser. Ceci nous fait revenir aux figures 168, 169 et 170, concernant les irrégularités des formes d'ondes à l'intérieur du pavillon. La surface parfaitement polie n'est peut-être pas l'idéal. D'autre part, dans bien des réalisations commerciales, la finition des pavillons est grossière, laissant à nu de gros défauts de finition très sommaire. On devrait, au contraire, faire une transposition en optique d'un tel système, pour lequel le polissage des lentilles et la précision sont des points essentiels. D'autre part, le travail au tour des pavillons possède le défaut de laisser de fines rainures concentriques alors qu'il serait souhaitable d'avoir celles-ci dans le sens longitudinal ou encore d'avoir une finition différente. Selon certains,

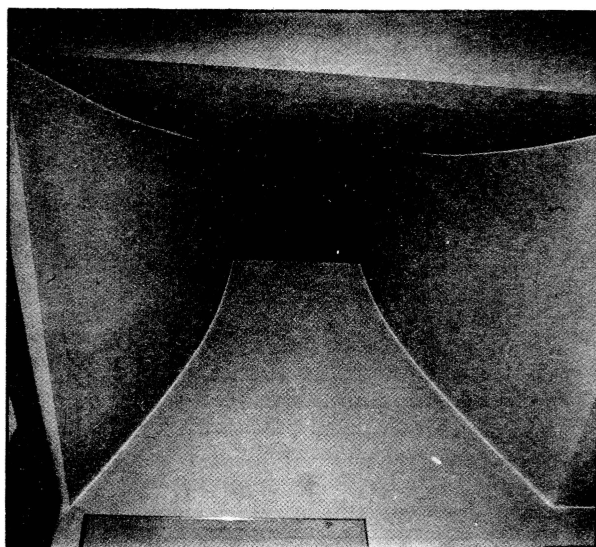
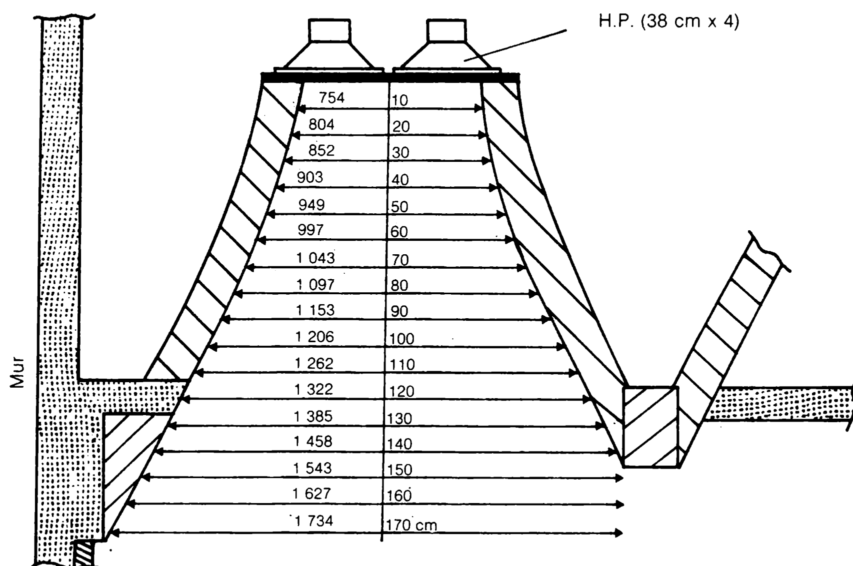




*Fig. 208 : Système de reproduction utilisant à 100 % le pavillon, depuis le haut-parleur de grave (fréquence de coupure 20 Hz), jusqu'au tweeter, comprenant 4 voies.*

*Le pavillon de grave, relativement court, est chargé par 4 haut-parleurs Altec 515B. Ce système de très haut niveau, réalisé par le japonais M. Tamaru est célèbre au Japon en raison de ses performances très poussées*



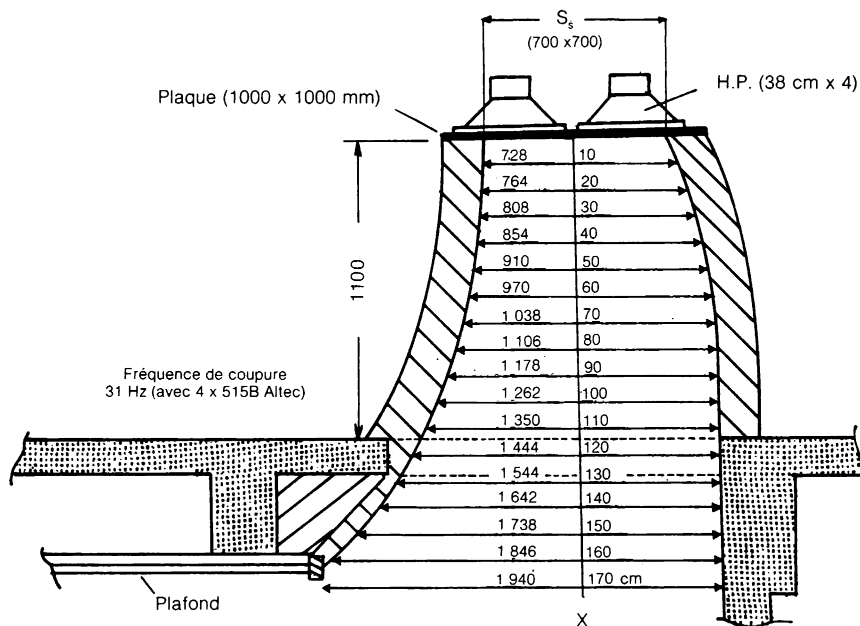



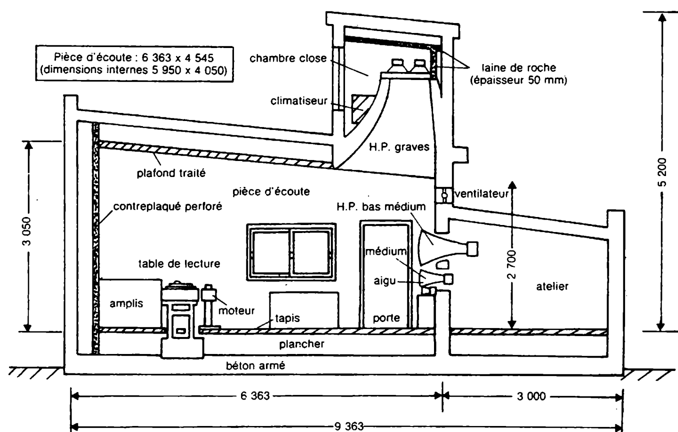

*Fig. 208 bis : Détails du système Tamaru (Tokyo, Japon).*

il est probable qu'un certain degré de rugosité soit préférable à une surface trop parfaitement polie. Cette rugosité, soigneusement choisie, pourrait apporter une sorte d'irrégularité en couche, très près des parois, une sorte de fin « coussin d'air » dont l'effet serait, malgré une légère perte due à cette friction, une plus grande régularité de la forme des ondes sonores principales. Ceci a été prouvé recemment au Japon, à l'aide de mesures poussées sur ordinateurs couplés à des interféromètres au laser, mesurant ces différences sur des pavillons au parois internes rugueuses, striées, polies ou finement satinées. Comme on le voit, il existe de nombreuses possibilités d'amélioration.

Au sujet du pressage de la membrane, ce point demande à être mieux résolu, afin d'obtenir une haute qualité liée à une production en série aux faibles tolérances. On sait que le pressage de la membrane, réalisée parfois dans des matériaux particulièrement rigides provoque de fortes contraintes à l'intérieur du matériau, ainsi que la formation de plis sur la périphérie de cette membrane. Si certains ont pu assez bien résoudre ce problème, celui de la tentative d'un dépôt sous vide de ces matériaux sur un moule pourrait donner des tolérances de fabrication très serrées. Il reste nécessaire de procéder à une opération supplémentaire de recuisson, laquelle demande à être réalisée sans déformation conséquente de la membrane (torsion en forme de « 8 », « gauche », par exemple). La résolution pratique de ces problèmes techniques permettrait, par contre d'obtenir une membrane aux cotes très précises et apportant aussi le maximum de rigidité. De plus, cette méthode pourrait permettre de réaliser d'une pièce la membrane, sa suspension, (qu'il serait possible de réétudier), ainsi que le support de la bobine mobile, (jusqu'ici collé sur la membrane). En effet, le collage pose divers problèmes, depuis le problème technique de fiabilité en passant par les problèmes pratiques d'homogénéité du collage et surtout des problèmes concernant la qualité subjective. Sur ce point on voit donc le travail restant à faire.

Du côté rendement, circuit magnétiques, aimants, il reste encore des progrès importants à faire et les nouveaux matériaux d'aujourd'hui pourraient sans doute permettre de perfectionner ce transducteur.

Tout cela montre que ce transducteur pourrait avoir un avenir très brillant. En effet, de nombreuses nouveautés en haut-parleurs concernent des systèmes à pavillon et chambre de compression, depuis la reconnaissance par les grands constructeurs des grandes qualités de certaines productions artisanales de très hautes performances. La reprise de cette technologie en haute fidélité, pour ne pas dire très haute fidélité sera donc, nous le souhaitons, très fructueuse.




*Vue en coupe de la pièce d'écoute de M. Tamaru. Remarquer l'isolement mécanique de la table de lecture par rapport au plancher. Les murs latéraux sont doubles. La paroi interne est faite en contreplaqué perforé (trous de diamètre 8 mm espacés de 15 mm). L'espace entre les parois est rempli de laine de roche. Le mur dorsal est amorti par un épais rideau.*

C'est fin 1988 que la firme américaine JBL, une des pionnières en matière de chambres de compression, commercialisa le modèle portant la référence 2450J. Cette chambre de compression réunit plusieurs innovations qui méritent une brève description. On a pu remarquer, en se reportant au chapitre des pièces de phase, qu'il était possible de concevoir celles-ci de différentes façons, la formule la plus connue étant celle des fentes concentriques. En adoptant cette disposition, on met en évidence plusieurs inconvénients. En partant du plan formant le début de la gorge, on s'aperçoit que la distance entre ce plan et la membrane n'est pas exactement la même pour chaque canal concentrique. Il en résulte, à partir d'une certaine fréquence, des phénomènes de résonances et d'anti-résonances dus au fait que le début de la gorge ne peut plus être considéré comme une surface plane se déplaçant en piston dans la bande de fréquences à reproduire. D'autre part, on s'aperçoit également que plus les canaux se rapprochent de la périphérie de la membrane et plus on s'écarte de l'axe du pavillon. La fente annulaire périphérique qui, du côté membrane, se trouve pratiquement au niveau de la bobine mobile, devrait normalement être favorisée du point de vue étendue de réponse aux fréquences élevées. C'est cependant celle qui se situe le plus hors de l'axe du pavillon. Ces problèmes de directivité à la sortie de chaque fente annulaire ne doivent pas être surestimés non plus car ces fentes sont étroites et il en résulte une dispersion presque omnidirectionnelle des ondes sonores à la sortie de celles-ci. Les défauts résultant de ces problèmes de fentes concentriques de longueur différente se produisent généralement au dessus de 5 kHz, fréquence à partir de laquelle la membrane parvient difficilement à se déplacer en piston. Il devient en conséquence difficile de différencier les défauts provenant de ces problèmes de différence de longueur des fentes concentriques ou de la membrane elle-même, ceci d'autant plus qu'il existe une interaction entre des non-linéarités de pression acoustique au niveau de la sortie de la pièce de phase et le mode de vibration de la membrane à diverses fréquences. Autrement dit, le comportement vibratoire d'une membrane donnée en fonction de la fréquence est, dans le cas des chambres de compression, étroitement lié au type de charge frontal ou dorsal, ce qui inclut le capot arrière, son traitement acoustique interne, la pièce de phase, sa structure, sa masse et sa disposition par rapport à la membrane ainsi que le pavillon. La chambre de compression JBL 2450J citée plus haut fait appel au principe des fentes concentriques disposées de façon à produire des « ondes cohérentes » d'où l'appellation « Coherent wave compression driver ». La figure 208(c) montre une vue en coupe de cette nouvelle chambre de compression. On y remarquera la forme très particulière des fentes concentriques qui prennent une forme de « S » près du bord de la membrane. Cette forme a deux buts : égaliser la longueur des fentes concentriques et orienter les ondes sonores, à la sortie de la pièce de phase dans l'axe du pavillon. On remarquera encore que près de la périphérie, la membrane attaque les fentes de face ou pratiquement, ce qui améliore la transmission des fréquences élevées par rapport aux pièces de phase conventionnelles. Cette chambre de compression est dotée d'autres innovations. Un nouveau type d'aimant à base de terres rares au néodymium est utilisé. Extrêmement puissant, il présente l'avantage d'offrir, pour des valeurs de champs magnétiques égales, des dimensions encore plus réduites que celles d'un aimant au samarium-cobalt. Cet aimant en forme de couronne est représenté en A sur la figure 208(c). Toujours sur ce modèle, JBL a adopté sa suspension brevetée « Diamond » (plis en forme de losanges faisant place aux plis tangentiels sur les suspensions classiques). La membrane en titane comporte une surface finement embossée, ce qui réduit les tensions mécaniques internes, les vibrations résiduelles et évite le mode de fractionnement brutal à certaines fréquences. Dernière remarque à propos de cette chambre de compression : la forme du front d'onde à la sortie de la pièce de phase tendrait à être non pas plane mais légèrement convexe, ce qui devrait permettre une meilleure adaptation avec le pavillon.

La difficulté de réalisation des chambres de compression modernes réside prin-

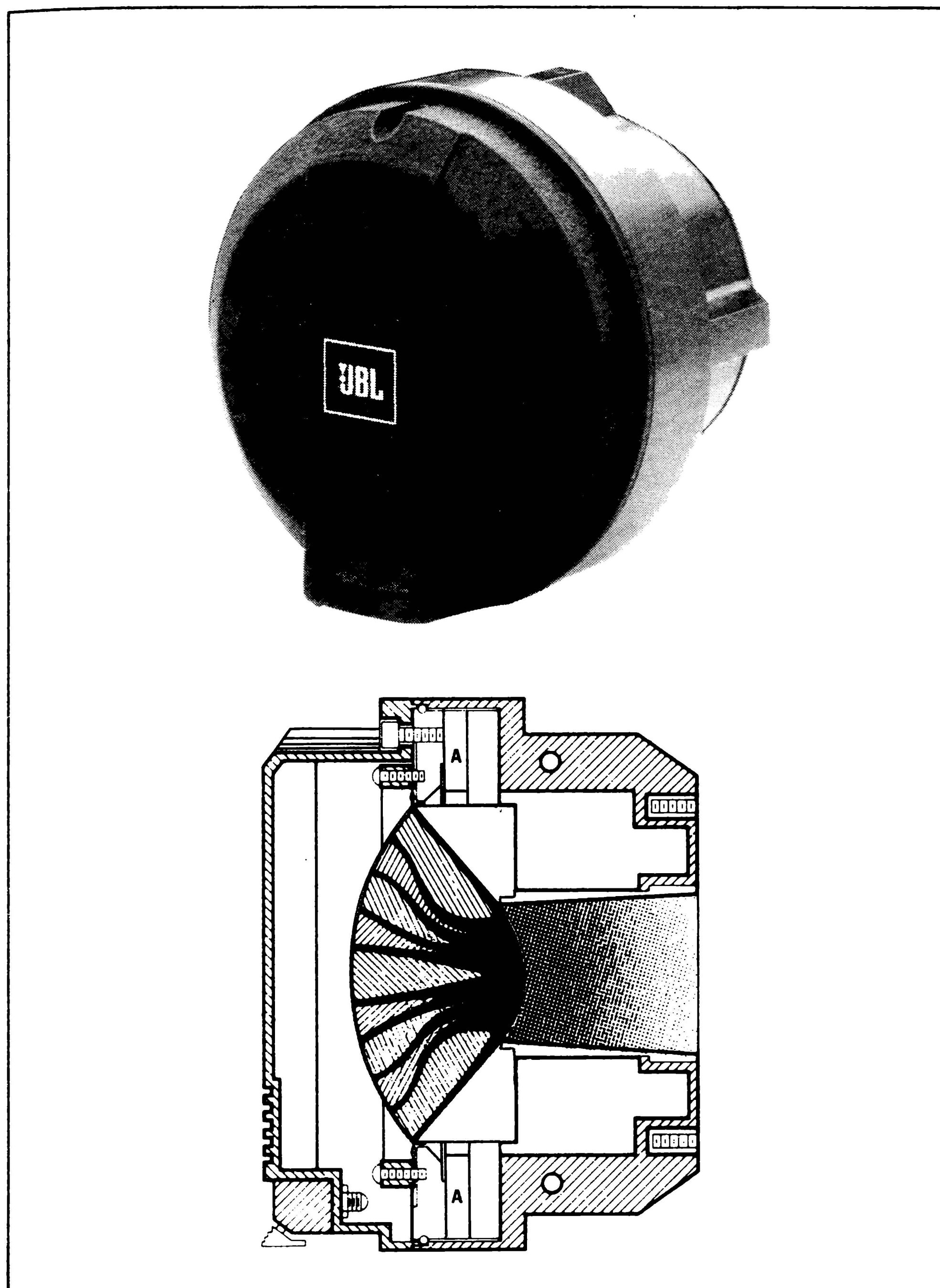



*Fig. 208(c) : Nouvelle chambre de compression JBL 2450J (fin 1988). Un nouveau type d'aimant ultra-puissant mais de dimensions très réduites (représenté en A) est à base de Néodymium. La pièce de phase comporte des fentes annulaires à « ondes cohérentes », de longueur identique, alignées en phase selon la technique JBL « Coherent Wave ». La membrane en titane comporte une surface embossée qui réduit la distorsion à pleine puissance. De poids réduit (4,8 kg seulement), le 2450J offre une bande passante étendue et régulière dans le haut du spectre sonore.*

cipalement dans la recherche d'une meilleure tenue en puissance en conjonction avec une réponse en fréquence régulière et étendue dans le haut du spectre sonore. Il faut alors avoir recours à de nouveaux types de matériaux dont l'utilisation, le mode de fabrication et la fiabilité ne sont pas toujours parfaitement maîtrisés.

Les chambres de compression modernes ne font, dans presque tous les cas, que reprendre des idées proposées au cours des années 30 mais avec pour avantages des possibilités de mesure plus poussées, des matériaux et des méthodes de fabrication plus évoluées. Le brevet d'invention n° 2 037 187 de la chambre de compression Western Electric WE 594A explique en effet « qu'il est impératif que les ondes sonores émanant de diverses portions du diaphragme parviennent à la gorge du pavillon après avoir parcouru exactement la même distance, faute de quoi il se produirait une chute rapide de niveau aux fréquences élevées. » S'il est vrai qu'à cette époque les systèmes d'enregistrement sonore ne permettaient pas d'obtenir une réponse très étendue aux fréquences élevées, les constructeurs n'étaient pas pour autant désintéressés par la conception de chambres de compression large bande. On trouve même en 1933, toujours chez Western Electric, une chambre de compression « deux voies ». Une de ses faces était reliée à un pavillon grave replié dont la gorge prenait place dans l'embouchure, ce qui permettait à l'autre face de la chambre de compression de servir de voie médium-aiguë. On trouvera cette idée originale, proposée également en 1933 par Edward C. Wente et A.L. Thuras, ainsi qu'une vue en coupe de la chambre de compression WE 594A sur la figure 208(d). Notons à ce propos que certaines firmes telles que Maxonic (Japon) continuent de fabriquer des chambres de compression avec moteur à excitation (D 101 EX, alimentation A1-50) et des tweeters multi-pavillons rappelant les inventions décrites sur la figure précédente. La reproduction des fréquences graves ou très graves à

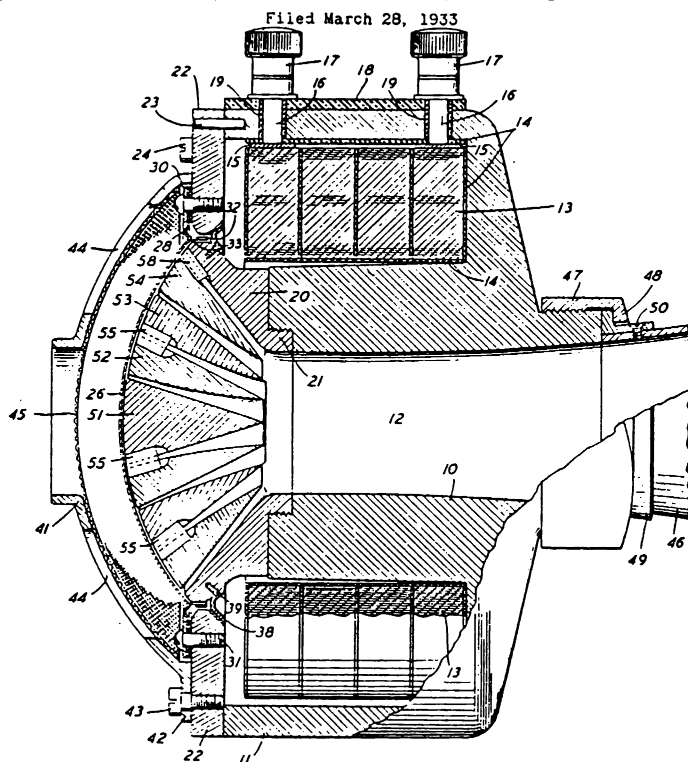



*Fig. 208(d) : Chambre de compression Western Electric WE 594A (1933).*

l'aide d'une chambre de compression a toujours buté sur des questions de coût de revient et d'encombrement. Le pavillon proposé par Western Electric en 1933 possédait une embouchure avoisinant les 25 m² et ne semble pas avoir obtenu de succès dans les grandes salles de cinéma. Au Japon, la firme YL (Ale Acoustic) a conçu dès les années 70 une chambre de compression (référence D-1250) qui pesait 26 kg et qui était capable de reproduire, en association avec le pavillon replié LH-5 la bande 16 Hz∿150 Hz. Très encombrant, ce genre de système reste aujourd'hui encore le seul capable d'atteindre un rendement aussi élevé, c'est-à-dire de l'ordre de 20 à 50 %.

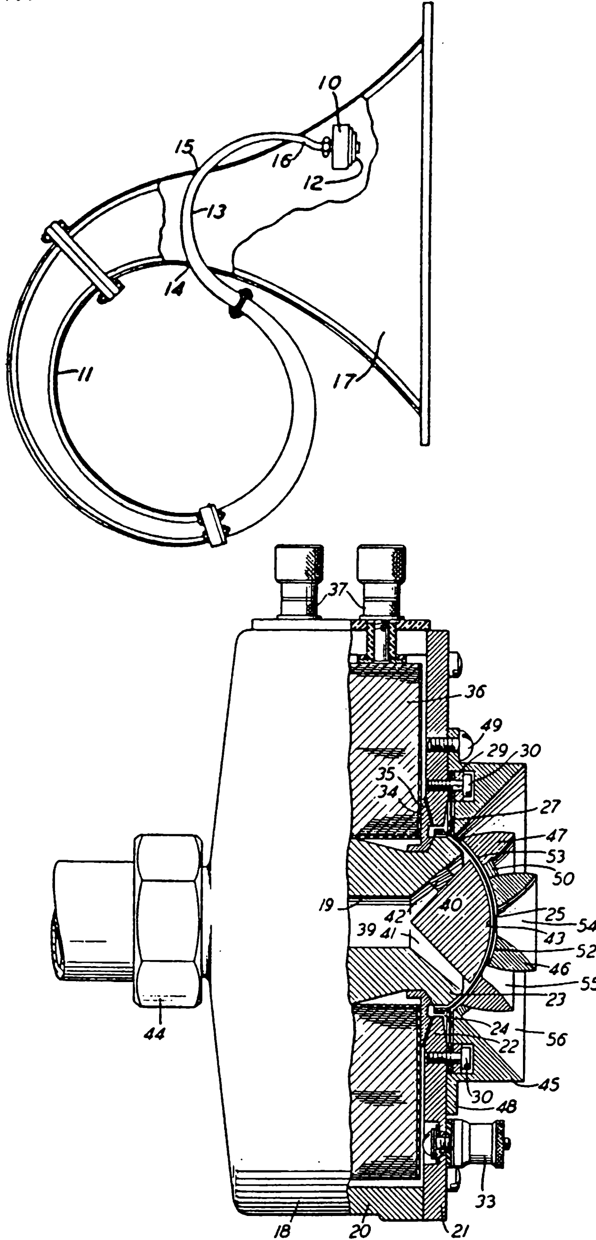



*Fig. 208(d) (suite) : Prototype de chambre de compression deux voies proposé par Western Electric.*

## Deuxième partie

### Les enceintes acoustiques

Les haut-parleurs, sauf quelques cas spéciaux (doubles membranes travaillant en phase etc.) émettent un rayonnement acoustique sur deux faces, les deux émissions étant en opposition de phase. Pour les basses fréquences cette interférence est connue sous le nom de « court-circuit acoustique ». Ce court-circuit acoustique produit, pour les fréquences graves, une chute de niveau (figure 209).

Le montage du haut-parleur sur un baffle plan ou dans une enceinte acoustique, peut apporter une amélioration de la courbe de réponse, par séparation et traitement de l'onde arrière (augmentation du niveau aux fréquences basses par exemple). Toutefois, il ne faut jamais perdre de vue que l'enceinte acoustique, aussi bien conçue qu'elle soit, apporte toujours quelques défauts : résonances parasites, résonances à l'intérieur du coffret, effets de diffraction acoustique dûs à la présence et aux formes du coffret. Le but de l'enceinte sera d'absorber l'onde arrière avec le moins de dégâts possibles, ou encore d'utiliser cette onde arrière à l'aide d'artifices mécano-acoustiques : pavillons repliés, labyrinthes, évents, circuit résonateurs etc.

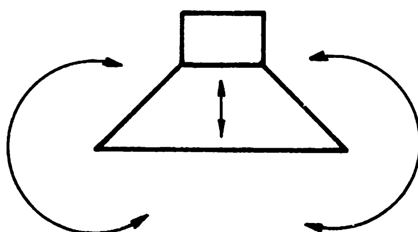


*Fig. 209 : Effet connu de court-circuit acoustique, sur les haut-parleurs électro-dynamiques.*

### Baffles et enceintes acoustiques

Le tableau de la figure 210 montre schématiquement les principales possibilités pratiques existantes, depuis le baffle plan de dimensions finies, jusqu'à l'enceinte close. Ce tableau permet d'avoir une idée générale des principales possibilités, celles-ci étant, bien sûr, combinables entre elles. On aboutit alors à une quasi infinité de combinaisons.

Ces diverses possibilités seront vues en détail plus loin. 17 possibilités principales permettent de comprendre que la majorité des enceintes peuvent être rattachées à un de ces modèles. De plus, il n'a pas été fait état, ceci afin de ne pas trop compliquer le tableau, des divers moyens pratiques de traitement de l'onde sonore utilisés couramment, tels que la laine de verre, le feutre, les plaques perforée, les circuits résonateurs, les diffuseurs, les lentilles acoustiques.

Une infinité de paramètres jouent donc sur le résultat final, depuis les formes et les dimensions du baffle ou de l'enceinte, jusqu'au genre de bois utilisé, en passant par les nombreux intermédiaires (haut-parleur, traitement de l'onde arrière, forme de l'enceinte, dimensions, disposition du haut-parleur etc. Rien que pour une

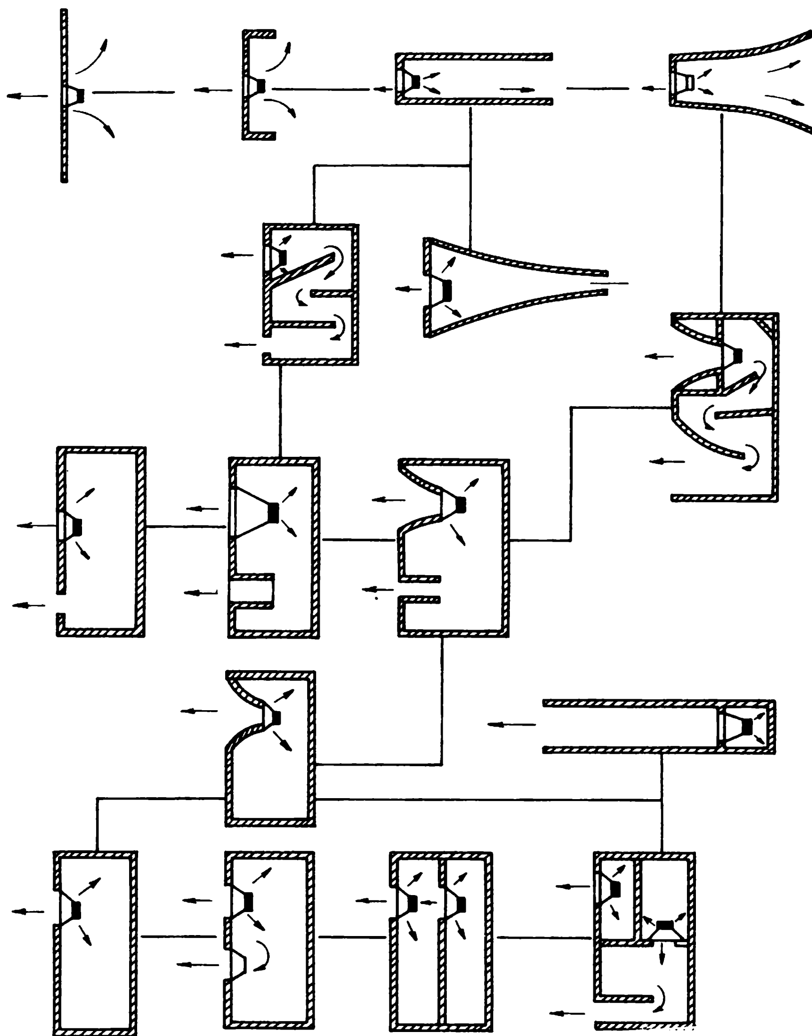


*Fig. 210 : Tableau schématique des différentes technologies de l'enceinte acoustique, depuis le baffle plan jusqu'à l'enceinte close. En combinant ces principes de base, il est possible de réaliser une infinité de variantes.*

enceinte close ou de type « Bass-reflex », il serait donc possible de s'étendre sur de nombreuses pages sans pouvoir épuiser le sujet, même en se limitant à des dimensions et à un type de haut-parleur prédeterminés. Il est plus intéressant d'avoir une vue d'ensemble du problème, en gardant présent à l'esprit l'importance des détails.

Mais, avant tout, il est nécéssaire de retenir un point jugé essentiel : une enceinte de trop petit volume sera toujours défavorable à la reproduction des sons graves, à la distorsion, au niveau acoustique maximum (amplitude de déplacement de la membrane du haut-parleur trop importante) et à l'efficacité. Sur ce point, il faut surtout considérer le fait que les réalisations courantes dans le domaine des haut-parleurs électrodynamiques possèdent des structures d'aimants limitant les performances. De ce fait, une trop grande élongation de la membrane, nécessaire si l'on désire obtenir un niveau sonore acceptable, se traduira par des ennuis de toutes

sortes, (dont il avait été question dans le chapitre sur les aimants et les circuits magnétiques). Quelques systèmes offrent d'assez bons compromis, comme ceux à charge symétrique. Il en est de même pour les systèmes correctement asservis, mais ces derniers sont difficiles à bien mettre au point et sont parfois onéreux. Le bon sens permet de dire aussi qu'il existe toujours un rapport volume de la salle d'écoute/dimensions optimum de l'enceinte/diamètre des haut-parleurs qu'il est nécéssaire de respecter plutôt que de se fier à d'autres impératifs purement esthétiques ou pratiques. En résumé, il est préférable de s'en tenir à des volumes d'enceinte plus conséquents, en restant dans les limites du raisonnable.

Abordons le problème du rapport des dimensions de l'enceinte, des formes de celle-ci. Mis à part les questions de volume, certains rapports de dimensions sont favorables ou défavorables et certaines formes peuvent améliorer ou détériorer plus ou moins les caractéristiques de directivité. Ceci peut s'expliquer facilement par les effets de baffle modifiant le rayonnement acoustique ou encore par la création d'ondes stationnaires difficiles à supprimer, dans un rapport de dimensions donné. Sur ce point, les impératifs d'ésthétique, d'encombrement ou de prix de revient exigent des compromis. Certains livres spécialisés traitent de ces questions, tels que les excellents ouvrages du regretté G.A. Briggs : Reproduction sonore à haute fidélité, Haut-parleurs (Editions Radio, 1958).

De même, pour les baffles plans, munis de bords, comme pour les enceintes acoustiques de formes diverses, il est nécessaire de se référer très souvent aux travaux de Harry F. Olson, l'un des plus éminents électro-acousticiens de notre époque.

## Baffles plans

Les études sur les baffles plans remontent à 1919 (Button) et à 1934 (Mac Lachlan). La figure 211 montre un exemple de haut-parleur monté sur baffle plan de forme circulaire, afin de ne pas introduire des phénomènes perturbatoires qu'apporteraient une forme carrée ou rectangulaire. Le signal émis par la face avant se trouve en opposition de phase vis-à-vis de celui émis par la face arrière du haut-parleur. Il va se produire un court-circuit à certaines fréquences, la distance parcourue par ces deux chemins vers le même point d'écoute n'étant pas la même.

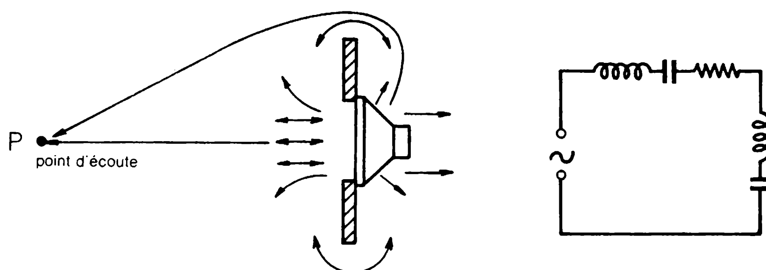



*Fig. 211 : Baffle plan. Coupe schématique, équivalent électrique.*

En un point P, situé dans l'axe du haut-parleur, il se produira donc des court-circuits acoustiques dont l'intensité va varier selon la fréquence. La courbe de réponse amplitude/fréquence, assez irrégulière, ainsi obtenue, est maintenant compréhensible : lorsque la différence du chemin parcouru par l'onde avant et l'onde arrière jusqu'à ce point P équivaut exactement à la 1/2 longueur d'onde du signal reproduit, on constate, par effet d'opposition des signaux acoustiques en ce point P, une

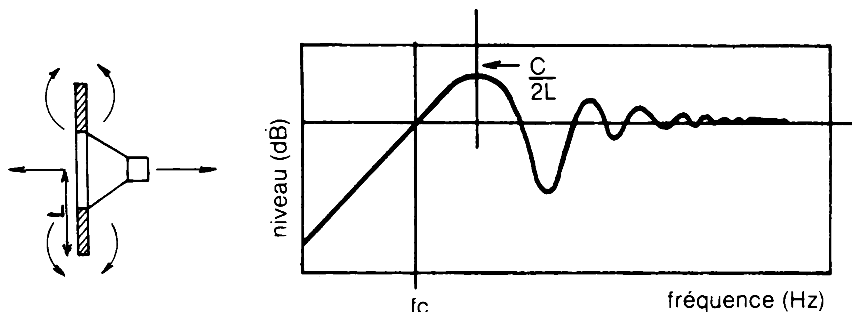



*Fig. 212 : Courbe de réponse typique d'un baffle plan (C = 340 m/sec.).*

baisse brutale du niveau acoustique résultant. Cependant, suivant la longueur d'onde du signal émis par le haut-parleur, la variation de différence de ces chemins parcourus par l'onde avant et l'onde arrière vers ce point P va provoquer une succession de bosses et de creux dans la courbe réponse, correspondant à des additions ou soustractions de ces deux ondes. On obtient ce que donne la figure 212, une courbe montante, une résonance principale, suivie d'une anti-résonance, puis enfin d'une succession de résonances et d'anti-résonances dont l'amplitude va baisser peu à peu (court-circuit acoustique de moins en moins prononcé au fur et à mesure que la fréquence augmente). Auditivement, ces effets seront beaucoup

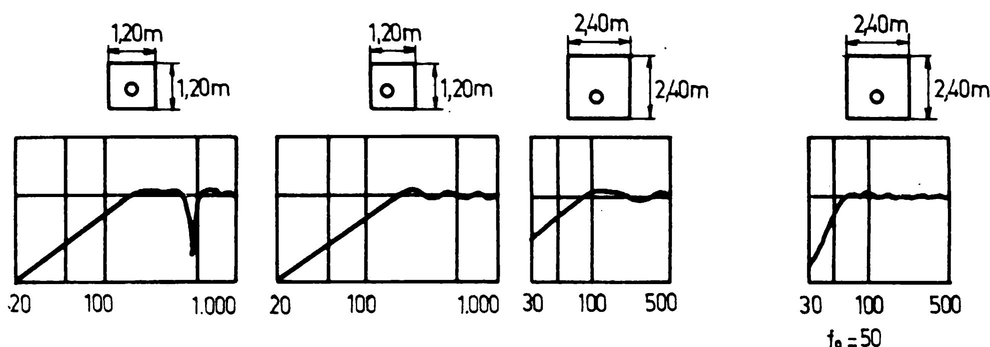



*Fig. 213 : Allure des courbes amplitude / fréquence de baffles de forme carrée sur lesquels les haut-parleurs sont positionnés de différentes façons. On peut obtenir une excellente linéarité en modifiant la position du haut-parleur. Ce principe est utilisé pour les baffles standard destinés aux mesures.*

moins sensibles. En effet dans une acoustique habituelle, formée en grande partie d'ondes réfléchies (même pour ce que l'on nomme souvent les « ondes directes ») ces creux et ces bosses ne seront pas trop ressentis subjectivement. La chute de niveau aux fréquences graves, due au court-circuit progressif vers les fréquences graves, sera fonction des dimensions du baffle. Cette fréquence de coupure fc se détermine simplement par la formule fc = 17000/*l*, pour laquelle fc est exprimé en Hz et *l* en cm.

Sur la figure 213, on voit l'allure d'une courbe de réponse obtenue sur des baffles de section carrée et de dimensions différentes. Plusieurs positions sont essayées pour le haut-parleur. Ce haut-parleur est en effet, soit centré, soit décalé. On constate qu'un décalage judicieux permet d'obtenir une excellente linéarité. Cette posi-

tion décalée du haut-parleur sur un baffle plan carré est très souvent adoptée sur les baffles normalisés, utilisés pour les mesures.

### Baffle plan muni de bords (coffret ouvert)

L'étude de ces coffrets ouverts remonte à 1923 (Keller). En 1951, ceux-ci ont été réétudiés (Mach et Williams, A.E.S.). Il s'agit, en termes simples, d'un coffret sans fond, dont les bords sont de profondeur variable. Cette formule était très souvent utilisée sur les vieux postes de radio, où le fond ajouré, afin de laisser se dégager la chaleur émise par les lampes, était acoustiquement transparent. Pour ces coffrets ouverts à l'arrière, les divers paramètres de dimensions, (dimension de la face avant plus profondeur des bords) vont modifier notablement la courbe de réponse . La figure 214 montre ce que l'on obtient dans quelques cas. L'optimisation des dimensions et la disposition du haut-parleur sur la face avant sera délicate, en vue de la recherche d'une bonne linéarité. De nombreux essais « cut and try » seront nécessaires. Comme pour le baffle plan, on note toujours la chute aux fréquences basses, due aux court-circuits progressifs vers ces fréquences. Cet effet est cependant atténué par la présence des bords, par rapport au baffle plan.

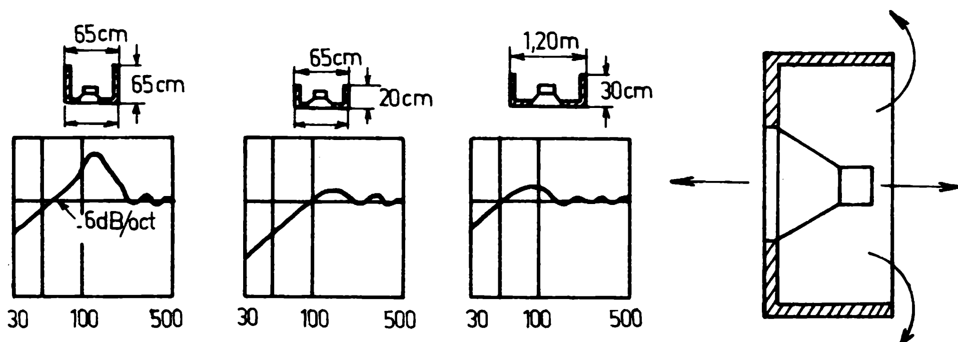



*Fig. 214 : Influence d'un baffle plan muni de bords, sur la courbe amplitude / fréquence. Plusieurs dimensions de ce baffle montrent les influences sur la courbe de réponse.*

## Autres enceintes acoustiques

### Coffret clos

Il est déjà question de ceux-ci dès 1923. Les premières études sérieuses semblent remonter aux travaux de Fréderick.

La fig. 215 montre un exemple (courbe de réponse moyenne résultante et équivalent électrique). La plus sérieuse étude est due à Olson (Brevet américain n° 545672 du 19 juillet 1944). Ce dernier publia une série de mesures sur des enceintes closes de formes très diverses. Ce document très connu est reproduit figure 216.

La forme sphérique provoque donc le moins d'accidents dans la courbe de réponse. Ensuite viennent les deux autres formes dont les angles coupés réduisent l'effet de bord, phénomène courant sur bien des enceintes.

L'émission sonore ne se fait que par le côté avant de la membrane, il est donc nécessaire d'absorber l'onde arrière. Ceci se fera par le moyen d'absorbants tels que la laine de verre, les fibres synthétiques, le feutre etc.

Ces absorbants peuvent présenter le défaut d'une efficacité non linéaire en fonction de la fréquence. Ces différences seront parfois nettement perceptibles à l'écoute. Dans le grave, (au dessous de 100 Hz) ces absorbants perdent rapidement leur efficacité. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que cet absorbant devrait effectuer, par effet de friction, une parfaite transformation de l'énergie sonore en énergie calorifique. Un moyen simple consiste à « allonger » le chemin que parcourt l'onde sonore à travers l'absorbant, en plaçant dans celui-ci de multiples plaques réfléchissantes, de petites dimensions et placées dans des sens non déterminés. Pour effectuer plus efficacement cette transformation acousto-thermique, il faudrait utiliser un absorbant thermiquement conducteur. Certains absorbants très récents (Japon, USA) sont ainsi réalisés à partir de laine métallique (acier, etc) extrêmement fine. Ces matériaux sont par contre d'une manipulation délicate et d'un prix de revient plus élevé.

Les dimensions du coffret jouent sur la fréquence de coupure et également sur la linéarité de la courbe de réponse, (en particulier pour la zone située au dessus de la fréquence de coupure). Ceci est dû à l'effet de baffle déjà cité plus haut. Un coffret de grandes dimensions et de profondeur suffisante est toujours souhaitable pour obtenir un bon résultat. La profondeur de l'enceinte joue sensiblement sur la sonorité et une enceinte relativement profonde est toujours préférable. Bien que l'enceinte « plate » ait un aspect esthétique moderne et élégant, on peut facilement

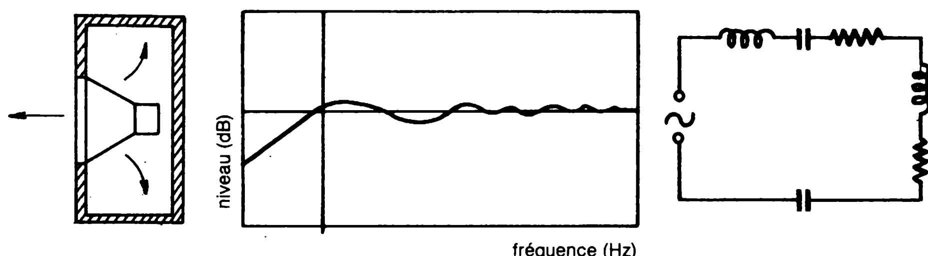
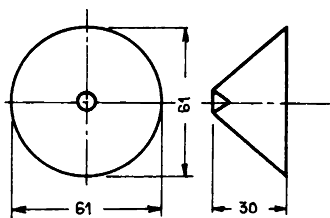
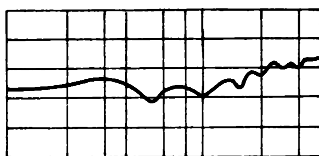
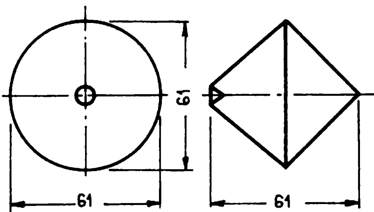
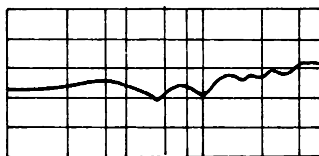
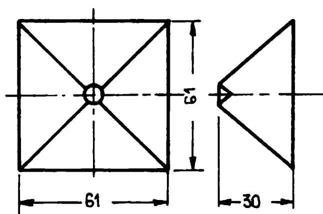
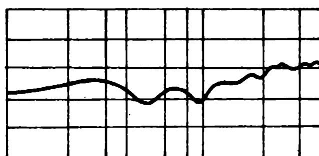
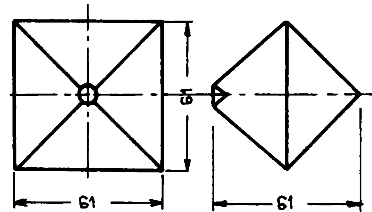
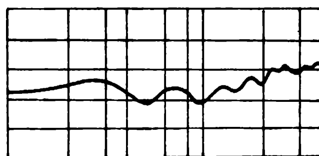
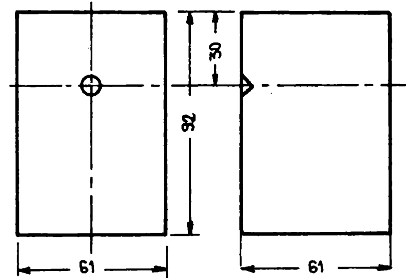
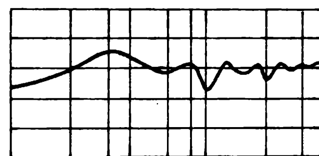
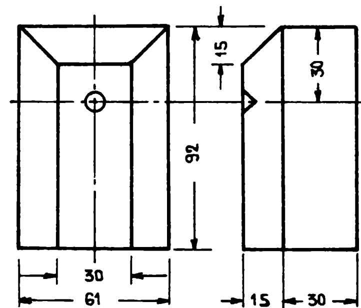
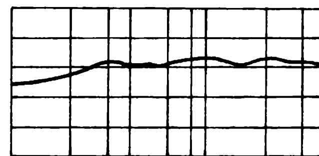



*Fig. 215 : Coffret clos. Coupe schématique, courbe de réponse typique et équivalent électrique.*

démontrer que la réflexion sur la paroi arrière, insuffisamment amortie par un absorbant, revient vers le haut-parleur dont on peut considérer la membrane comme acoustiquement transparente. Ce phénomène est difficile à bien determiner car de nombreux paramètres peuvent interférer les uns sur les autres. Il existe cependant, un test simple (fig. 217) consistant à placer une paroi, amortie ou non, plus ou moins loin du dos du haut-parleur. Sans modifier d'autres paramètres (fréquence de résonance etc.) on peut démontrer facilement que la paroi arrière est d'autant plus gênante qu'elle est placée près du haut-parleur.

Le haut-parleur électrodynamique monté en enceinte close possède une bande passante relativement limitée dans le secteur grave, surtout si on ne dépasse pas un volume de 100 litres.

C'est en 1954 que l'américain Edgar Villchur proposa une nouvelle méthode de reproduction des basses fréquences, utilisant un coffret clos de dimensions réduites. Cette méthode appelée « Suspension acoustique » obtint un grand succès. Le modèle « Acoustic Research » AR 3 resta de longues années une enceinte acoustique appréciée dans le monde entier. Ce système utilisait un haut-parleur à membrane lourde (plus de 100 g) et à haute compliance, placé dans une enceinte close de petit volume.


61
61
30


61
61
61


61
61
30


61
61
61


30
92
61
61


15
30
92
30
61
15
30


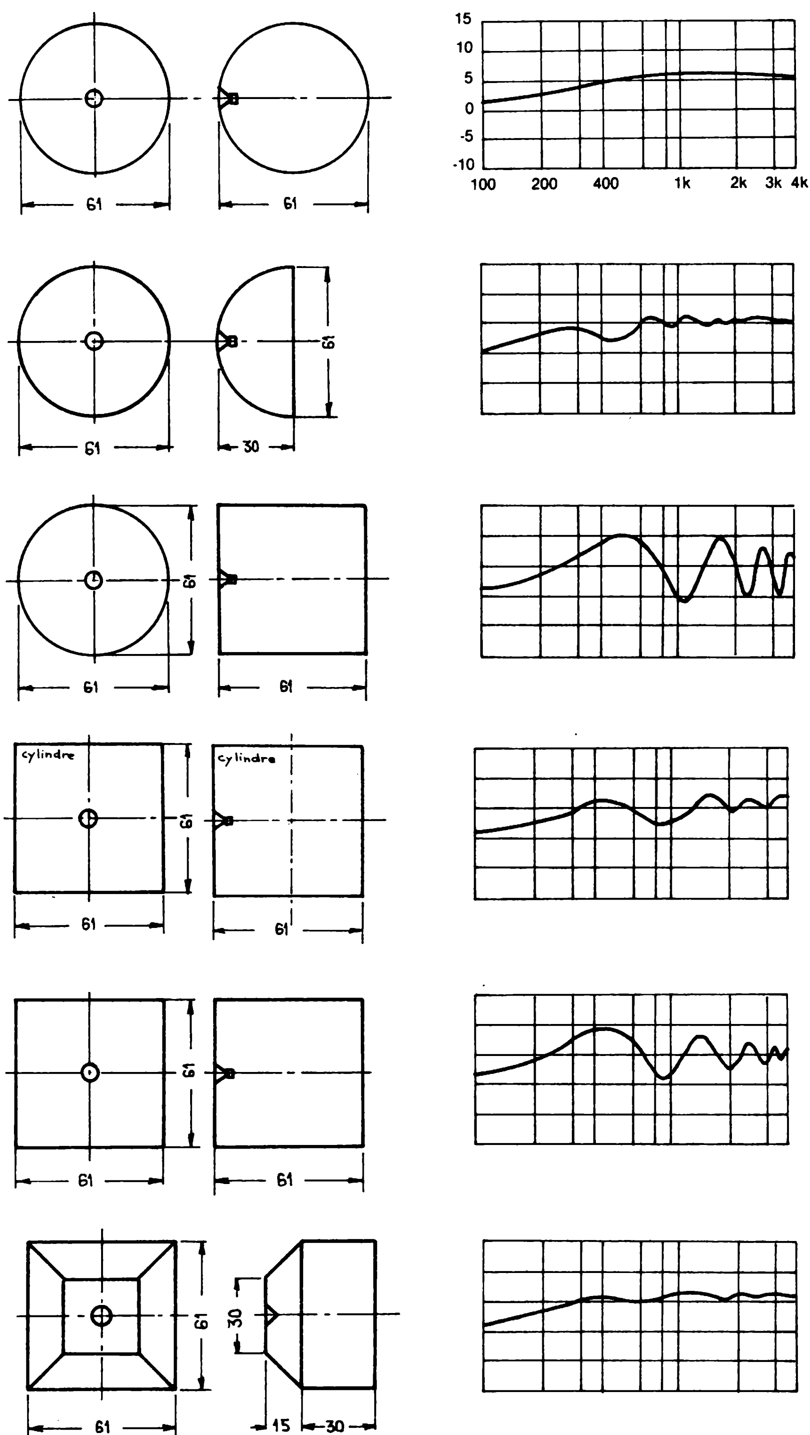



*Fig. 216 : Courbes amplitude / fréquence obtenues à partir d'enceintes de formes diverses. (selon Olson).*

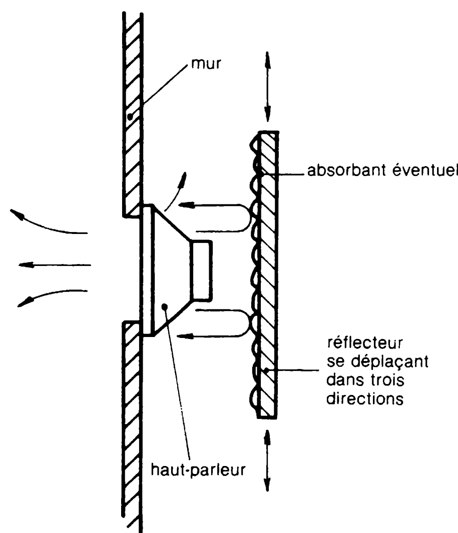



*Fig. 217 : Mise en évidence de la réflexion parasite de la paroi arrière de l'enceinte, sans que d'autres paramètres soient modifiés (fréquence de résonance en particulier). Cette expérience sur baffle infini (trou dans le mur) montre l'effet de réflexion sur la paroi dorsale, même recouverte d'absorbant. Elle démontre l'avantages d'enceintes profondes.*

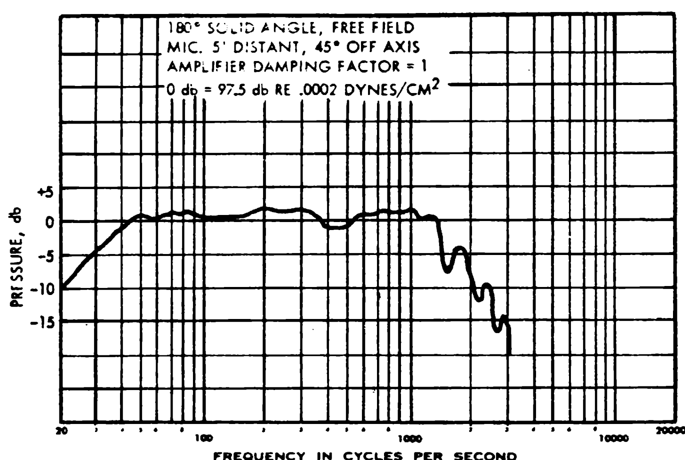



*Fig. 217 bis : Courbe amplitude / fréquence d'une enceinte « révolutionnaire » proposée en 1957 par Edgar Villchur. Ce principe, appelé « suspension acoustique » par son constructeur Acoustic Research, eut une influence très nette sur les constructeurs mondiaux, au niveau de la technologie de la suspension (en demi-tube), de la membrane (épaisse et lourde) et du volume de l'enceinte (volume réduit). (Doc. A.E.S., Juillet 1957).*

L'intérieur était fortement amorti. La suspension du haut-parleur, entièrement étanche, était en demi-tube, convexe. Cette suspension obtint un succès tel qu'elle se généralisa sur les haut-parleurs de grave. La masse élevée de la membrane étendait la courbe de réponse dans le secteur grave et le rappel de la membrane à sa position de repos se faisait grâce à l'élasticité de l'air emprisonné dans le faible volume. Bien que ceci soit obtenu au détriment du rendement, la bande passante

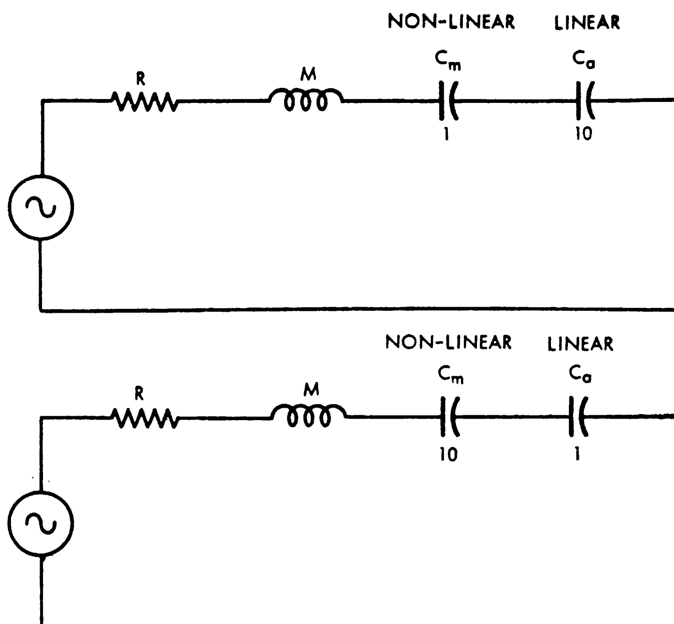



*Fig. 218 : Equivalent électrique simplifié d'une enceinte acoustique close (en haut) et d'une enceinte travaillant selon le principe de la « suspension acoustique » (en bas). Remarquer la différence dans les rapports $C_m$ et $C_a$ représentant respectivement les réactances mécaniques de la suspension et de l'air emprisonné à l'intérieur du coffret. (Doc. A.E.S., Juillet 1957).*

était remarquablement étendue dans le grave, surtout pour un volume aussi réduit. La figure 217 bis montre la courbe de réponse du modèle AR 1, enceinte fort connue. Sur la figure 218, on voit l'équivalent électrique de l'enceinte close à « suspension acoustique », par rapport à celui d'une enceinte close conventionnelle. Cette « révolution » dans l'enceinte close de faible rendement marqua profondément les constructeurs du monde entier. Cette formule est toujours beaucoup utilisée depuis. Elle ne présente pas que des avantages et ses défauts sont bien connus. Elle reste cependant un très bon compromis bande passante/volume.

## Enceinte anti-résonnante ou « bass-reflex »

L'enceinte dite « bass-reflex » est relativement ancienne puisque son étude théorique et ses diverses études pratiques reviennent à l'américain A.L. Thuras (1930). Ce dernier l'étudia au sein de la firme Edison-Bell, dont les travaux en électroacoustique, dans le domaine des transducteurs, des pavillons, des microphones et des phonolecteurs sont tout à fait remarquables. On doit notamment à cette firme la création du moteur 555W et des phonolecteurs 1A, 4A, 9A et 10A, ainsi que de quelques microphones aux performances exceptionnelles.

En 1936, ces diverses études furent reprises par Dickey, Caulton et Perry et furent publiées dans la revue Radio Engineering. L'optimisation de ces enceintes fut étudiée plus tard (Beranek, Stewart, Planet, Boswell).

La figure 219 montre la vue en coupe de cette enceinte, son équivalent électrique et la courbe de réponse moyenne obtenue. De nombreux ouvrages depuis les plus sommaires jusqu'aux plus poussés reprennent ces problèmes. Il ne sera retenu ici que quelques points jugés essentiels. La figure 220 montre les quatre équivalents

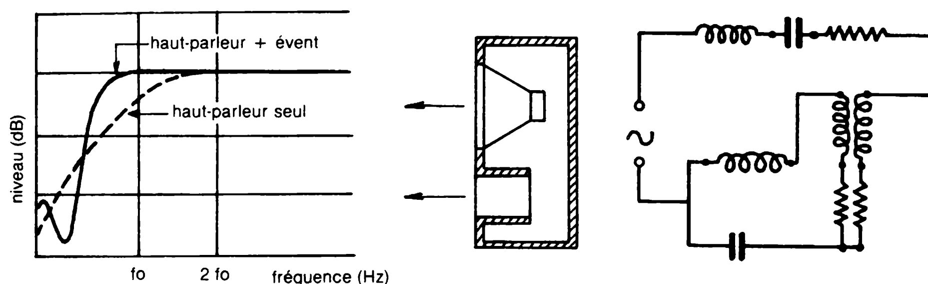
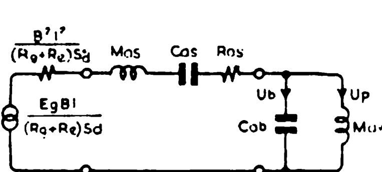


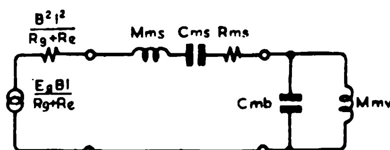

*Fig. 219 : Coupe schématique d'une enceinte Bass-reflex, ou anti-résonnante, courbe amplitude / fréquence typique et équivalent électrique.*

électriques de cette enceinte, selon l'australien A.N. Thiele (d'après son étude publiée dans le journal de l'I.R.E. (1961).

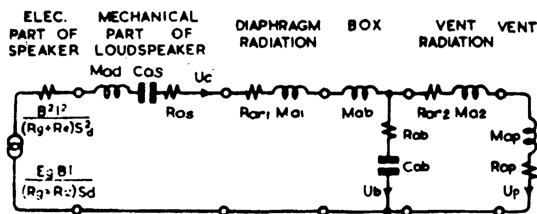
Il s'agit d'un système de type Helmoltz. La figure 219 montre que l'enceinte possède une « porte », appelée aussi « évent », qui peut, dans la pratique, revêtir divers aspects : long tuyau (amorti ou non), fenêtre carrée ou rectangulaire de dimensions et profondeur variables. Le circuit équivalent se divise en deux parties distinctes : le haut-parleur est représenté par un circuit série, composé de C (élasticité de la suspension de la membrane), R (résistance de rayonnement) et L(masse de la membrane + masse de l'air mis en mouvement), ainsi que par le circuit équivalent que forme l'enceinte acoustique. L'enceinte acoustique est représentée par un cir-




Equivalent simplifié




Deux autres équivalents simplifiés




Equivalent complet (selon Beranek)

*Fig. 220 : Quatre équivalents électriques de l'enceinte bass-reflex, selon Béranek et A.N. Thiele (I.R.E., Sydney, Mars 1961, A.E.S. Anthology, 1977).*

cuit résonnant LC où L est amorti(L = masse de l'air dans l'évent, C = élasticité de l'air dans le coffret et R = résistance de rayonnement de l'évent). La caractéristique d'impédance que l'on voit sur la figure 221 présente deux résonances. Cette figure explique schématiquement le fonctionnement de ce principe ainsi que les relations courbe d'impédance/courbe de réponse/rayonnements acoustiques du haut-parleur et de l'évent. Entre les deux bosses que présente la courbe de réponse se trouve un creux, appelé « anti-résonance », correspondant à la fréquence de résonance principale de l'enceinte. De part et d'autre de cette anti-résonance se trouvent deux résonances, appelées respectivement fréquence de résonance basse et fréquence de résonance haute.

Pour la fréquence de résonance basse, le circuit équivalent du haut-parleur est principalement capacitif. Celui de l'enceinte est principalement inductif.

Pour la résonance haute le haut-parleur devient inductif et l'enceinte capacitive. Ceci crée une augmentation du niveau acoustique (figure 219). Pour les fréquences inférieures à la fréquence de résonance, l'interférence entre les deux sources d'émission membrane/évent fait chuter rapidement le niveau. On dit souvent qu'une enceinte bien réglée doit avoir des résonances de même amplitude. En fait, l'optimi-

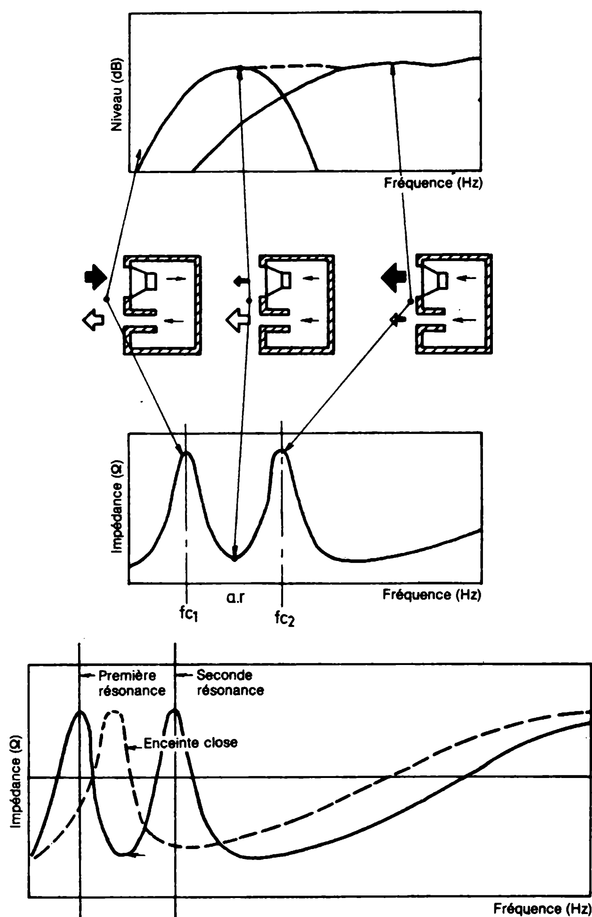



*Fig. 221 : Caractéristique d'impédance typique de l'enceinte Bass-reflex, travail de l'évent et du haut-parleur et influence sur les courbes (amplitude /fréquence, impédance).*

sation (surtout d'un point de vue subjectif) dépend de beaucoup d'autres facteurs et seules les méthodes conjuguant les expériences pratiques et les mesures permettent d'obtenir de bons résultats. Le revêtement intérieur du coffret influence aussi les résultats, mesure comme écoute. On connait aussi les bienfaits et les inconvénients des traitements absorbants (nombreuses variétés existantes) et leur utilisation en faible, moyenne ou grande quantité. Ces revêtements absorbants jouent beaucoup sur l'équilibre subjectif. En combinant ces effets aux variétés de haut-parleurs disponibles, aux possibilités d'accord (par calcul théorique) haut-parleur/enceinte, aux différents rapports de dimensions et de volumes on crée un nombre infini de combinaisons possibles. Seuls le calcul et l'expérience peuvent permettre de bien maîtriser les possibilités de ce type d'enceinte. Le positionnement du haut-parleur sur la face avant est d'autre part délicat, car un changement de position peut déplacer les résonances parasites, les ondes stationnaires se formant à l'intérieur du coffret. Ceci devient encore plus délicat si cette enceinte doit être accordée à un ou plusieurs haut-parleurs de médium-aigu.

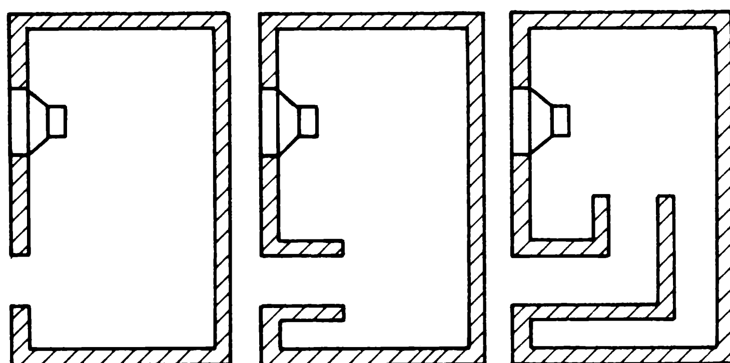


*Fig. 222 : Quelques variantes dans la conception des évents de l'enceinte Bass-reflex.*

Pour en revenir aux dimensions et profondeur de l'évent, il existe de nombreuses possibilités. La figure 222 en montre quelques exemples. Sur la figure 223 on voit aussi l'action de diverses profondeurs d'évent sur la courbe de réponse amplitude/fréquence. La courbe la plus linéaire n'est pas forcément celle qui donne le meilleur résultat subjectif. Tout ceci est une question d'optimisation réglages/calculs/écoute. Comme pour les haut-parleurs, cela demande une longue patience et relève presque de l'art.

L'enceinte Bass-Reflex peut également être amortie. Dans ce cas on peut soit utiliser un long tuyau, soit remplir l'évent d'un matériau résistant acoustiquement : laine de verre, mousse plastique etc.

On peut utiliser des évents multiples, méthode utilisée par Jensen dès 1940 (fig. 224). Il est important de noter qu'une enceinte Bass-Reflex bien étudiée et bien conçue peut apporter des résultats supérieurs aux enceintes closes, malgré l'opinion de certains. Le rendement est toujours supérieur (utilisation optimale de l'onde arrière) et le taux de distorsion aux basses fréquences est souvent plus faible qu'en enceinte close. Au Japon, une enceinte de type Jensen, mais soigneusement recalculée et optimisée en 1972 par la firme Onken permettait, dans un volume de 450 l environ, d'obtenir de très bons résultats (une grande linéarité, un taux de distorsion très faible et un rendement remarquable). Cette enceinte fut fabriquée par plusieurs milliers d'amateurs au Japon et son succès continue toujours. Pour les enceintes

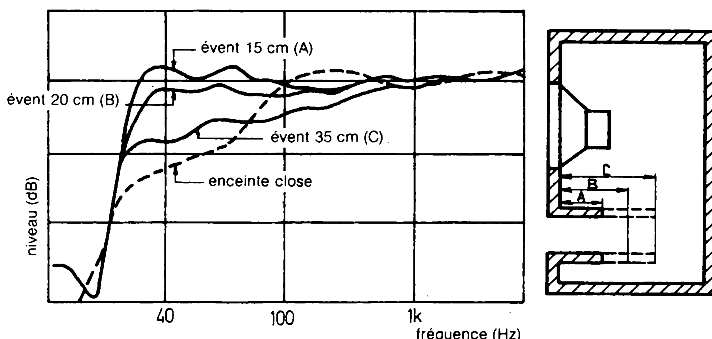



*Fig. 223 : Influence de la profondeur de l'évent sur la courbe amplitude / fréquence.*

acoustiques le volume est très déterminant vis-à-vis de la qualité de reproduction, de la linéarité de réponse amplitude/fréquence aux fréquences basses et du rendement. G.A. Briggs recommandait fortement les grands volumes. Ceci restera toujours fondamental : le progrès ne peut réduire la longueur d'onde, bien que l'on ait pu assez bien maîtriser le problème des petites enceintes. Sur ce point, l'influence des constructeurs sur les utilisateurs est très nette. Il y a 20 ans par exemple, les audiophiles ne bronchaient pas en plaçant dans leurs salons des enceintes de

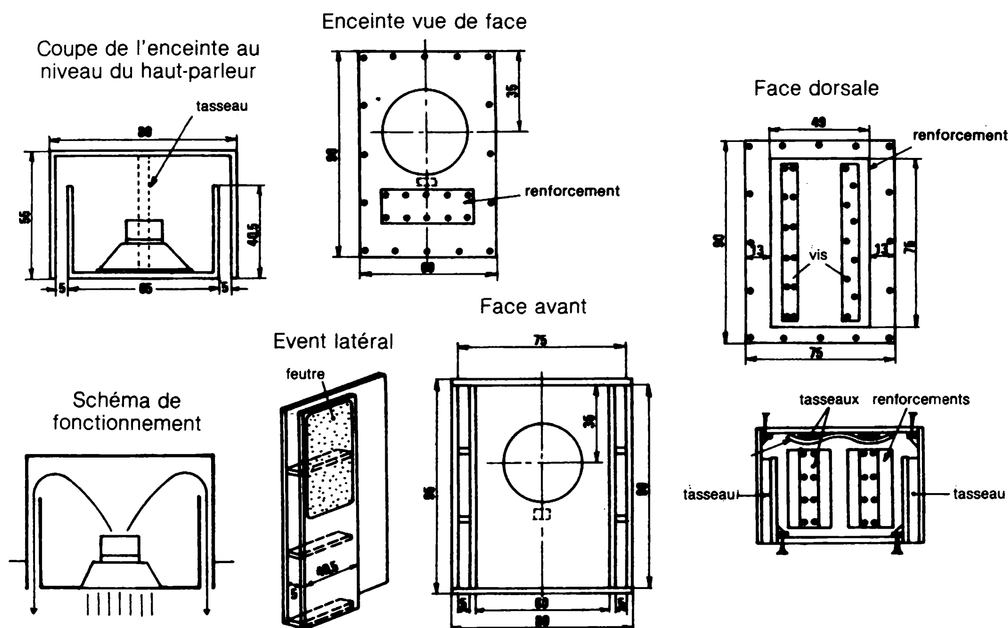



*Fig. 224 : Enceinte de type Jensen, à évents latéraux. Les dimensions ont été optimisées par la firma japonaise Onken (Japon), en 1971. Prévue pour les haut-parleurs américains Altec, de référence 416, 416-8A, 416-8B, 416-8C, 515B et 515C, elle obtint un succès considérable au Japon, auprès de milliers d'amateurs. Son rendement est remarquable (96 dB /m W), sa linéarité excellente et elle reproduit la bande 40 - 600 Hz. Réalisée dans un contreplaqué dur (genre « Nantex » ou « Panocéan » etc.), son intérieur comporte de nombreux raidisseurs dont un placé dans le sens de la profondeur, sous le haut-parleur. Sur certaines réalisations l'ensemble des parois est recouvert de feutre mou d'un cm. d'épaisseur.*

volume relativement important. Il ne sera que très peu question dans ce livre de l'acoustique des pièces d'écoute et de l'adaption des enceintes acoustiques à ces pièces d'écoute (ceci mériterait bien un livre entier). Il ne faut cependant jamais perdre de vue ces questions de rapport volume de l'enceinte/diamètre du haut-parleur et volume de la pièce d'écoute. Pour un volume donné, une surface donnée de pièce d'écoute, il existe un volume optimum d'enceinte, une diamètre optimum de haut-parleur, conditions devant théoriquement être respectées. Ceci détermine un point très important : l'équilibre sonore, fonction des possibilités du haut-parleur, de la forme et du volume de la pièce d'écoute.

Souvent, ce point important n'est pas respecté, pour des raisons économiques ou esthétiques. Une de ses conséquences est la raréfaction sur le marché des grandes enceintes acoustiques de haute qualité. A part l'enceinte de type « suspension acoustique » qui est un cas spécial, les enceintes de grand volume (ceci entend aussi le rapport diamètre du haut-parleur/volume du coffret), les grands baffles plans, les haut-parleurs encastrés dans les murs (baffles infinis ou presque) restent en effet les solutions les plus favorables à une reproduction de qualité (en particulier aux fréquences basses).

### Enceintes à attaque symétrique

C'est un type d'enceinte qui est revenu en vogue assez récemment car pouvant donner de bons résultats lorsqu'il est bien conçu. Les origines semblent remonter à Olson (U.S.A., J.A.E.S. 1947) et aux japonais Nomura et Kitamura (Japon, J.A.S. années 50). La coupe schématique de ce système utilisant deux haut-parleurs montés en parallèle est indiquée sur la figure 225. Cette méthode peut améliorer la réponse transitoire, grâce à un travail symétrique. Elle présente l'avantage d'étendre la courbe de réponse dans le grave. Sur cette même figure, on voit la courbe de réponse obtenue, ainsi que l'équivalent électrique de l'ensemble à double haut-parleur et double enceinte.

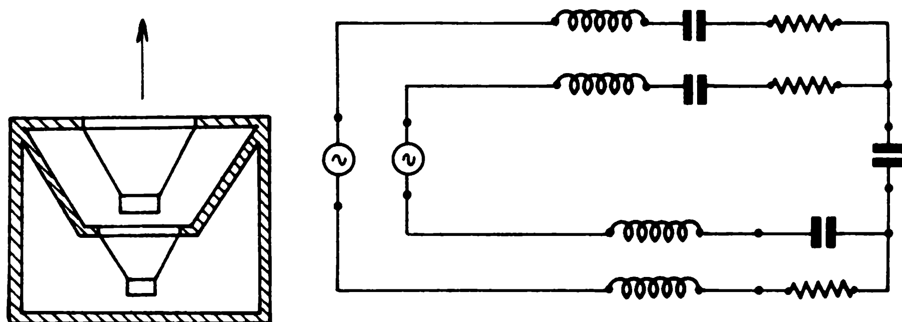


*Fig. 225 : Principe de l'enceinte à attaque symétrique. (Olson, 1947, Nomura et Kitamura, 1950).*

On parle aussi de cette enceinte dans la Revue du Son de août/septembre 1974 et son inventeur, M. Robert, utilisait deux panneaux placés l'un derrière l'autre, dans une enceinte close, contenant deux rangées de chacune 5 haut-parleurs de 12 cm de diamètre (fig. 226). En 1971, Joseph Léon avait également étudié ce type d'enceintes.

En 1974, A.D. Broadhurst proposait également une méthode pratiquement identi-

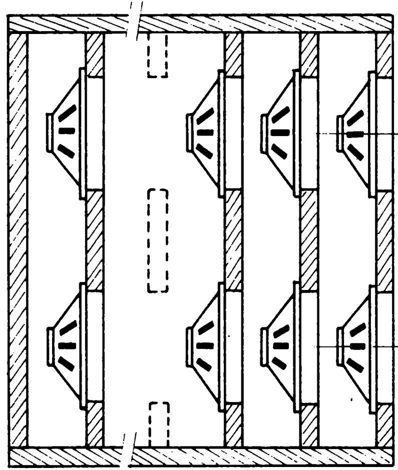


*Fig. 226 : Enceinte à charge symétrique, décrite dans la Revue du Son n° 256-257, Aout-Septembre 1974, par son auteur M. Robert. Bien que le schéma montre plusieurs rangées de haut-parleurs, l'auteur n'utilisa sur son prototype que deux rangées de cinq haut-parleurs, ayant chacun un diamètre de 13 cm. L'ensemble était destiné à la sonorisation de qualité de forte puissance.*

que de simulation de charge infinie. Les fig. 227 et 228 décrivent le système Broadhurt. Il est tenu compte des problèmes de cavité (volume d'air pris entre les haut-parleurs) et de vitesse d'accélération des diaphragmes. Pour la plupart des systèmes, les haut-parleurs sont reliés en parallèle et le « tandem » utilisé comporte parfois des haut-parleurs légèrement différents (masse du diaphragme, fréquence de résonance etc...). Ceci exige une mise au point assez délicate et il est préférable de perfectionner un tel système par des mesures faites en parallèle avec des écoutes subjectives.

Pour ces haut-parleurs le degré d'étanchéité des membranes est une question importante. La cavité située entre les deux haut-parleurs devrait théoriquement être

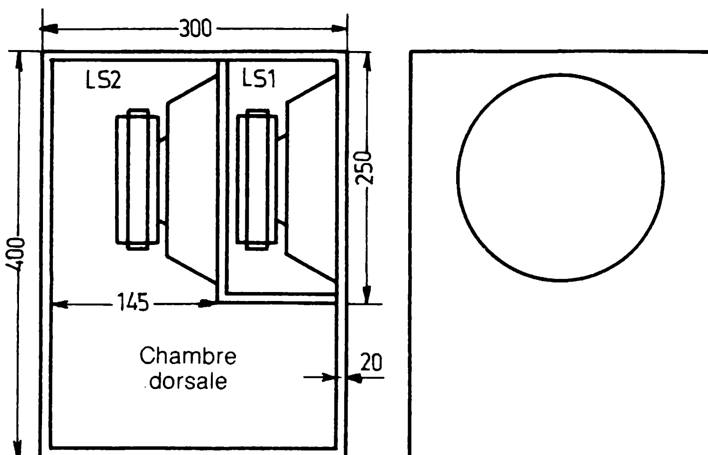



*Fig. 227 : Coupe schématique du système à charge symétrique Broadhurst.*

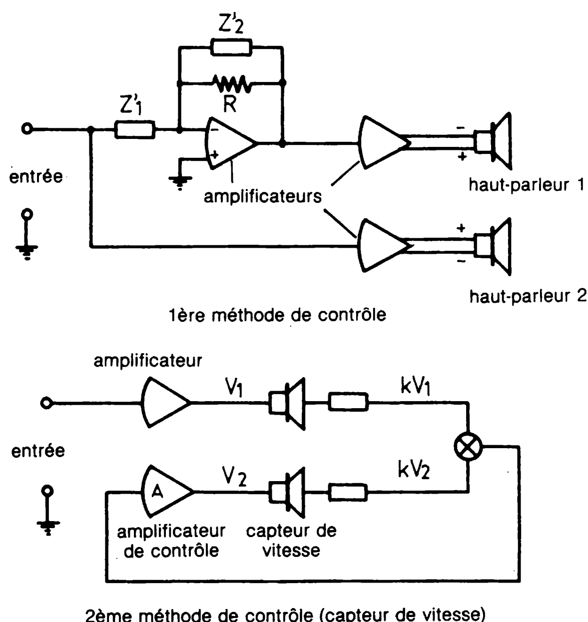



*Fig. 228 : Deux méthodes de contrôle du système à charge symétrique Broadhurst, proposé en 1974.*

considérée comme un volume constant (les deux membranes devant se déplacer en même temps).

Selon Robert, on trouve un équivalent électrique légèrement différent (figure 229) le couplage entre les haut-parleurs étant moins serré aux fréquences élevées.

Pour simuler une charge infinie, il faudrait en réalité une infinité de haut-parleurs placés les uns derrière les autres. Ceci est limité par des considérations de prix de revient ou de volume. Quant à la plupart des membranes et au type de fixation des châssis sur les baffles, ceux-ci ne sont pas toujours parfaitement étanches. Souvent, le pourtour des châssis(couronne venant s'appliquer contre le baffle) est enduit de mastic et des membranes étanches (bextrène, membranes plastifiées etc.), sont utilisées, pour améliorer l'étanchéité.

Lorsque les deux membranes travaillent en piston le comportement sera celui d'une enceinte « pseudo-infinie », où la première membrane agit sur un volume d'air constant.

On remarque aussi que les membranes, qui ont une forme proche d'un cône ouvert, sont placées l'une derrière l'autre et dans le même sens.
Les haut-parleurs sont placés le plus souvent l'un derrière l'autre, dans le même axe. Parfois on trouve des systèmes à haut-parleurs décalés, ou encore avec le second haut-parleur placé verticalement, ce qui rend le couplage aux fréquences élevées plus lâche. Dans ce cas, on peut considérer que le haut-parleur frontal travaille seul, aux fréquences élevées.

Pour ces fréquences élevées, lorsque les membranes sont placées l'une derrière l'autre et dans le même sens, on peut penser que, dès que ces membranes entrent dans des modes de vibrations non contrôlées par les bobines mobiles, le travail symétrique va amplifier ces déformations, au lieu de les minimiser.

Une autre solution consiste à placer les haut-parleurs l'un en face de l'autre, d'une façon symétrique par rapport au baffle frontal. La figure 230 montre la dispo-

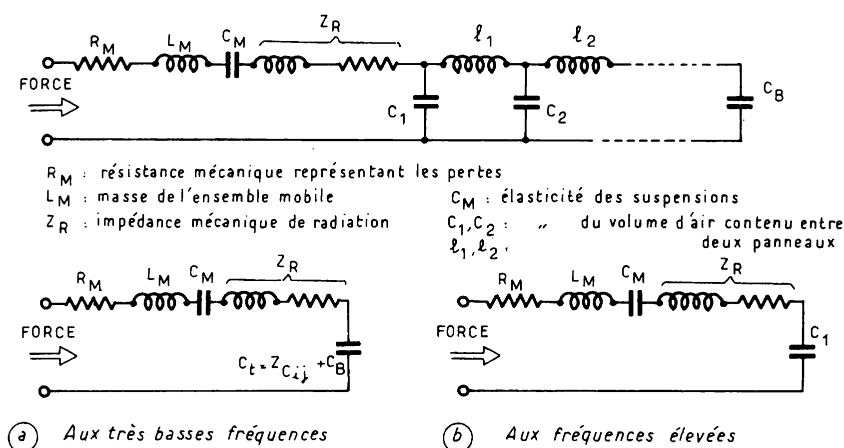



*Fig. 229 : Equivalents mécano-électriques de l'enceinte à charge symétrique, selon Robert (R.D.S. n° 256-257, Aout-Septembre 1974).*

sition de ceux-ci dans une enceinte pseudo-infinie. Cette méthode a été notamment utilisée en France par la société Audiotec (1976). Cette solution est également intéressante et on remarquera sur la figure le couplage serré entre les haut-parleurs.

Il est nécessaire de relier ceux-ci en parallèle et d'inverser la phase de l'un d'eux. Lors d'un signal appliqué sur les deux bobines mobiles, il se produira un déplacement unilatéral de l'ensemble. Une bobine rentrera dans l'entrefer tandis que l'autre en sortira : il s'agit d'un travail en « push-pull » (un avantage que ne possèdent pas les autres systèmes à charge symétrique décrits précédemment). Ceci est certainement profitable à une réduction de la distorsion et permettrait d'autre part d'abaisser la fréquence de résonance de ce « tandem ». Le second haut-parleur est chargé dorsalement par une enceinte de petit volume, mais qui est, par contre, relati-

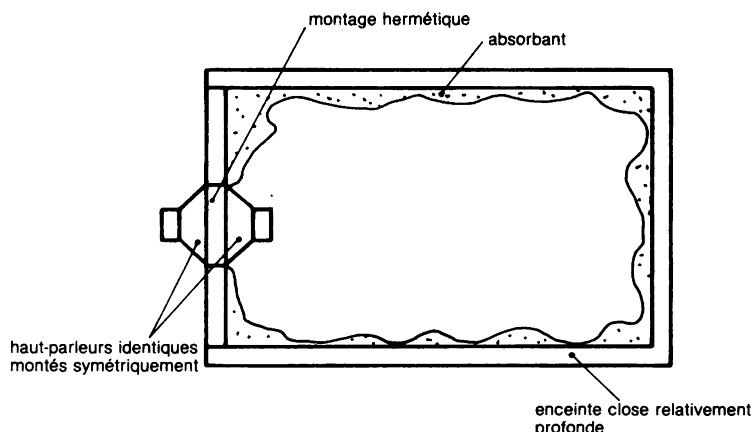



*Fig. 230 : Montage symétrique push-pull, utilisant un couplage serré entre les haut-parleurs. Les haut-parleurs sont montés en parallèle et en inversion de phase, ce qui procure un travail en « tandem ». (M. Vaissaire, Audiotec, France, 1976).*

vement profonde, ce qui évite la réflexion du fond, phénomène facilement décelable sur les enceintes relativement plates.

Ces diverses enceintes à haut-parleurs doubles ont récemment été reprises par divers constructeurs. Cependant, il est certain que l'enceinte de grand volume (avec ses défauts d'encombrement, de transport, de poids et de prix de revient), présente de nombreuses supériorités. Très souvent, les constructeurs déclarent qu'il est devenu possible, à l'heure actuelle, de « faire aussi bien » avec des petits volumes, ce qui est exact, mais au détriment des inconvénients. On parle aussi souvent d'une « quasi impossibilité » de placer des enceintes de grand volume dans un appartement. Or, à ce sujet, des sondages ont pu prouver le contraire : sans des considérations de prix, la plus grande majorité des auditeurs préfèrent des grandes enceintes, pourvu que les résultats obtenus soient supérieurs aux enceintes « bookshelf », aux enceintes de « bibliothèque ».

## Enceinte Kelton

Cette enceinte met en œuvre deux haut-parleurs, placés dans un enceinte à compartiments séparés. un ou plusieurs haut-parleurs rayonnent par la face avant (médium-aigu), un autre est placé à l'intérieur de l'enceinte, dirigé vers le bas, dans un volume assez important débouchant sur un évent faisait effet de filtre passe-bas (figure 231). Henry Lang en parle, dans la revue de High Fidelity (numéro Mai et Juin 1953). Il existe de nombreuses autres variantes utilisant par exemple de long tubes, des tuyaux concentriques allongeant la charge frontale. En 1969, la firme Hitachi proposait le système ASW, très proche de l'enceinte dite « Kelton ». Cette réalisation permettait, à l'aide d'un haut-parleur de 20 cm à membrane légère, d'obtenir une réponse très étendue dans le bas su spectre (35 Hz environ). Notons que le

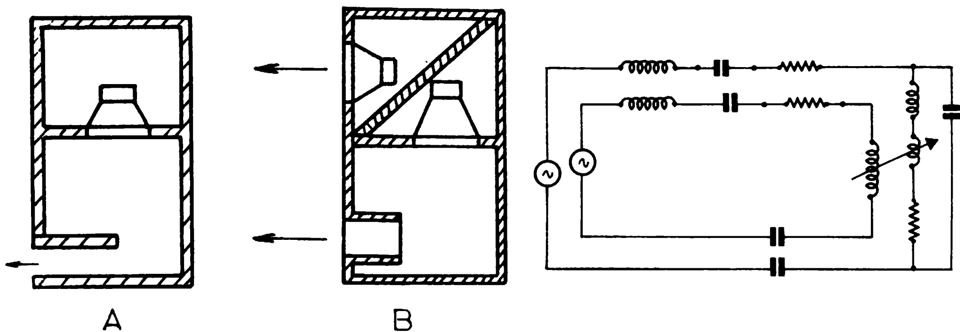



*Fig. 231 : Enceinte « Kelton ». L'onde avant charge un volume débouchant sur un évent tandis que l'onde arrière est absorbée par un volume clos. Cette enceinte est destinée à la reproduction des sons graves. L'évent peut avoir des profondeurs et largeurs variables. En A, un système à haut-parleur unique (caisson grave). En B, une enceinte à deux voies dont l'une est acoustiquement isolée de l'autre.*

haut-parleur de grave est soumis à ce filtre passe-bas, que la partie dorsale est chargée par une enceinte close et que la partie frontale l'est aussi, par un volume amorti ou un labyrinthe. Cette méthode ASW ou Kelton peut être modifiée en chargeant la face arrière du haut-parleur par un labyrinthe. L'enceinte à labyrinthe revient à charger le haut-parleur par un long tube sur sa face arrière (figure 232). Elle été concue par Olney en 1936. Il est possible de replier ce labyrinthe dans un volume plus réduit. On aboutit ainsi à une formule employée de longues années

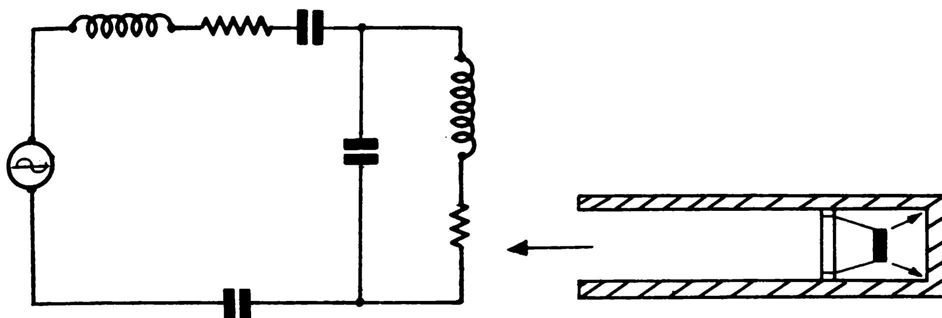


*Fig. 232 : Equivalent de l'enceinte décrite sur la fig. 231. C'est une enceinte close dont la partie frontale est chargée par un long tuyau, droit ou resserré près de son embouchure.*

avec succès. La figure 233 montre en coupe cette enceinte dont le labyrinthe doit être soigneusement amorti afin d'éviter les problèmes d'ondes stationnaires (nombreuses parois parallèles). Ce labyrinthe peut également posséder une section diminuant peu à peu jusqu'à l'évent. Cette autre méthode (figure 234) avait été proposée par A.R. Bayley de l'université de Bradford, en 1965. Elle fut notamment utilisée par les firmes Radford (G.B. années 70), et 3A (France, années 1975).

Le tableau du début de ce chapitre sur les diverses enceintes acoustiques montre que ces enceintes reviennent toujours à l'un de ces systèmes de base. Il s'agit toujours d'absorber ou d'utiliser l'onde arrière, avec inconvénients et défauts dans chacun des deux cas. Le système à pavillon arrière replié, muni aussi d'un pavillon frontal, apporte le maximum de rendement. Par contre, ces systèmes sont difficiles à mettre au point parfaitement, et leur construction est toujours compliquée voire coûteuse.

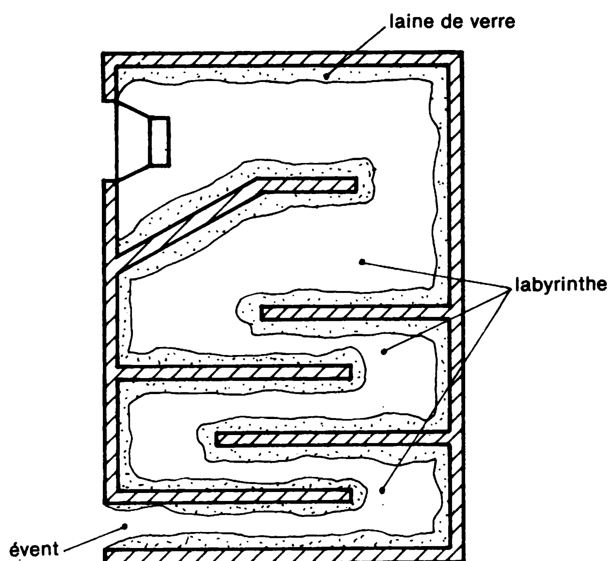



*Fig. 233 : Enceinte à labyrinthe, un procédé qui a longtemps été utilisé. Les chicanes peuvent être disposées de diverses façons, dans le sens vertical ou horizontal.*

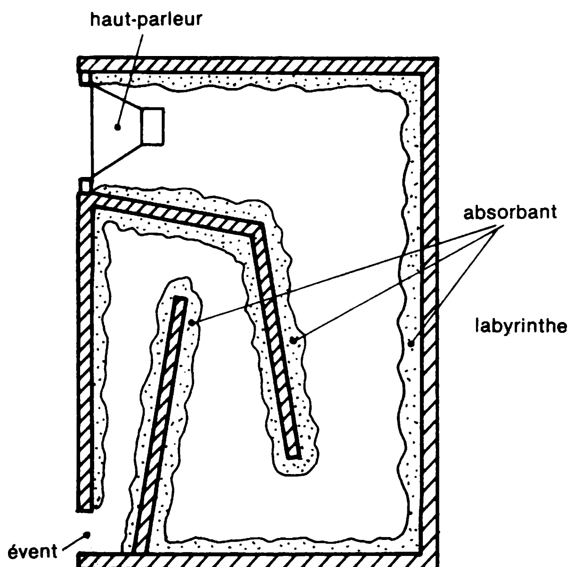



*Fig. 234 : Enceinte à labyrinthe, dite « Transmission Line », (ligne acoustique), une idée proposée par A.R. Bailey en Oct. 1965, reprise par la suite dans plusieurs pays (Radford Electronics, G.B., 3A, France).*

## Autres enceintes

D'autres enceintes peuvent présenter certains intérêts, (bien que la plupart reviennent à l'un des principes énoncés ci-avant sur le tableau). Citons parmi de très nombreux exemples d'enceintes « spéciales » les enceintes à « résonance diffuse » un procédé proposé par J.P. Dudognon (France) en 1962. Il consistait à envoyer l'onde arrière à travers une sorte d'épis (multitude de réflecteurs en bois vernis) qui annulait les ondes stationnaires, en dissipant l'onde arrière sans l'aide de matériau absorbant. Il est en effet assez connu que la laine de verre apporte un effet de « creux dans le médium » (provient aussi de l'absorption du retour de l'onde arrière sur la membrane), procurant un son moins riche en médium. Dans plusieurs

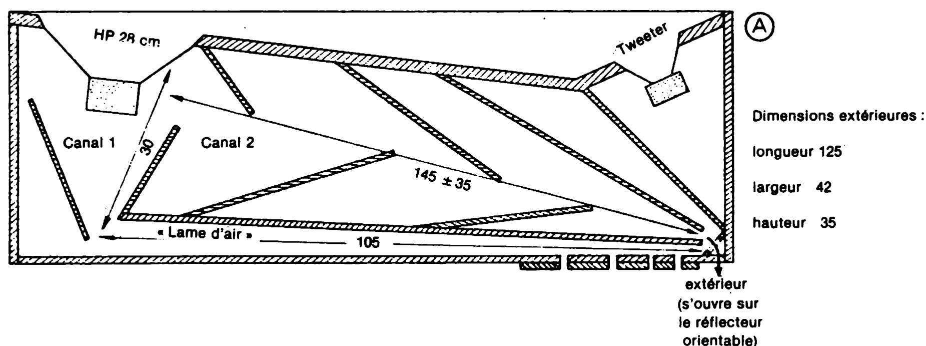



*Fig. 235 : Enceinte à résonance diffuse, proposée par J.P. Dudognon en 1962. Plusieurs variantes ont été proposées ultérieurement. Ce type d'enceinte n'utilisait pas d'absorbant interne et son rendement était excellent. La version ci-dessus s'utilisait en position horizontale.*

configurations d'enceintes à parois non parallèles, il est parfois possible de se passer d'absorbant. Tout cela fait aussi partie de l'appréciation subjective des haut-parleurs, des enceintes acoustiques, de l'acoustique du local. Ce domaine est d'ailleurs tellement vaste et important qu'il ne pourrait être traité sérieusement que dans un ou plusieurs livres.

Pour en revenir à l'enceinte à résonance diffuse, une coupe est représentée sur la figure 235. Elle était réputée pour avoir un excellent rendement, une partie de l'onde arrière étant récupérée à travers le circuit acoustique en épis.

Notons sur cette figure que l'enceinte n'est pas entièrement close et comporte une sorte de fenêtre réglable et un réflecteur légèrement orientable.

## L'enceinte R.J.

C'est une enceinte connue, de nom du moins, peu appliquée actuellement. Elle est intéressante car utilisant l'onde avant et l'onde arrière. L'enceinte R.J. avait autrefois été commercialisée par diverses maisons dont Jensen aux USA. L'invention ne vient cependant pas de Jensen.

Ses inventeurs sont Frank Robinson et William Joseph. Cette enceinte avait été publiée en janvier 1953 dans la revue américaine Audio Engineering. C'est une enceinte qui possède une fente latérale sur sa face avant derrière laquelle se place, à quelques centimètres, un baffle où est fixé le haut-parleur (figure 236). Cette fente étroite a pour but de faire travailler la membrane sous des variations de pression plus grandes et d'améliorer le couplage avant/arrière, les sons sortant du même endroit. Cette enceinte peut être modifiée. On peut remplacer la fente latérale par un trou rond de même diamètre que le haut-parleur (voir la même figure).

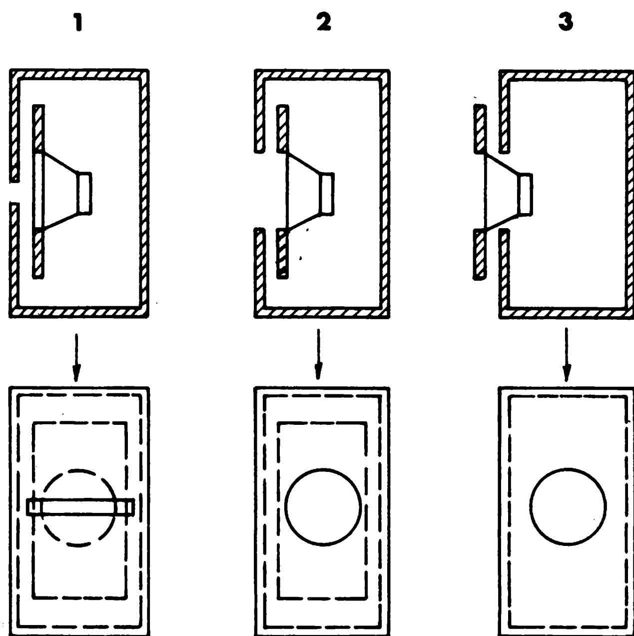



*Fig. 236 : Enceinte « R.J. » dans ses trois versions principales. La version 1 est la plus ancienne (F. Robinson, W. Joseph, 1953). La version 3 est également connue et fut utilisée en France par la firme Supravox, au cours des années 55-70.*

Toujours sur cette figure, on voit une autre version appelée (par erreur !) R.J. Celle-ci avait été utilisée sur quelques enceintes américaines, ainsi que sur des enceintes françaises de marque SEM et Supravox. Sur la troisième variante l'onde avant et arrière ne débouchent pas sur le même endroit. On peut assimiler cette enceinte à une sorte de baffle infini et percé à un endroit, derrière lequel est placé, très près, une enceinte dont l'intérieur est absorbant. Cette enceinte présente des qualités certaines : le faible couplage avec l'enceinte réduit le « son de boîte ». Ce son de boîte provient d'une question de rapports dimensions/ventres de vibrations/ondes stationnaires. Il dépend aussi du traitement interne et des vibrations parasites des parois (variations brusques de pression acoustique à l'intérieur de l'enceinte).

## L'enceinte Bradford Bakers

Cette enceinte, évoquée brièvement ici, est une enceinte close, (figure 237, mais comportant à l'arrière une sorte de « charnière mobile », un volet pivotant sur un axe latéral supérieur. Aux faibles variations de pression l'enceinte est « pseudo-close »; lors d'élongations importantes du diaphragme, le débattement du volet permet de limiter les variations de pression à l'intérieur de l'enceinte. Ce principe semblerait ne présenter que peu d'intérêt. On peut l'assimiler en partie aux enceintes utilisant un radiateur passif, autre système inventé par H.F. Olson en 1954 et publié cette même année dans le journal de l'AES.

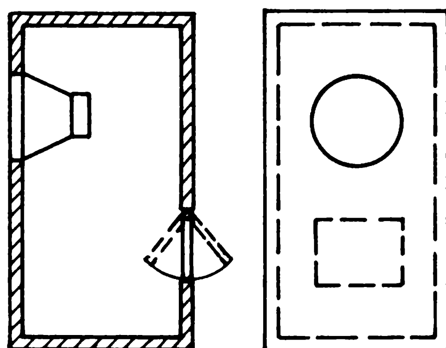


*Fig. 237 : Enceinte Bradford Bakers (G.B.), réalisée vers 1960. Remarquer la présence, sur le dos de l'enceinte d'une porte montée sur charnière.*

## L'enceinte Carlson

Cette enceinte de forme curieuse (figure 238) avait été proposée par Stromberg et Carlson, dans les revues Radio et TV News, Audio Engineering et High Fidelity, au cours des années 50-54..

Elle se rapproche d'une enceinte bass-reflex, à la différence près que sa face avant est munie d'un baffle à couplage progressif. Elle obtint un certain succès auprès des amateurs de hifi aux USA, en Grande-Bretagne ainsi qu'en Scandinavie.

La découpe en « V inversé » du baffle placé sur la face avant, ainsi que la position en biais du haut-parleur apporte certainement une caractéristique de directivité particulière et recherchée. Son rendement était excellent.

*Fig. 238 : Enceinte Carlson, proposée vers 1950. Cette enceinte obtint un grand succès auprès de milliers d'amateurs, des années durant.*

## L'enceinte Jensen S-100

C'est un modèle d'enceinte utilisant trois haut-parleurs de façon originale. Basé sur le système de la matrice stéréophonique, il permet de reproduire, à partir d'une seule source sonore centrale, l'effet stéréophonique. La construction de l'enceinte est curieuse : devant une enceinte close contenant un haut-parleur envoyant un signal monaural (somme G + D) sont placés deux haut-parleurs, à 90° par rapport à l'enceinte principale.

La figure 239 permet de mieux comprendre cette disposition. Les deux autres haut-parleurs, montés en série et en opposition de phase l'un par rapport à l'autre reçoivent la différence des signaux de gauche et de droite, soit respectivement (G—D) et —(G—D). Lorsque ces trois signaux, c'est à dire le signal monaural et les deux autres signaux, sont émis à partir du même point, dans des directions données, ils reconstituent dans l'espace des sources fictives, grâce à l'application des formules simples :

$$(G - D) + (G + D) = 2\,G$$
$$-(G - D) + (G + D) = 2\,D$$

Sur l'enceinte S-100 de la firme américaine Jensen cette matrice était donc mise à profit. Elle permettait aussi, à partir d'un seul point, situé dans l'axe d'écoute de l'auditeur, de créer des sources latérales fictives, ceci avec un angle d'ouverture relativement large.

La matrice ne peut fonctionner parfaitement que si les trois haut-parleurs sont parfaitement identiques et placés dans les mêmes conditions. Or, dans le cas du haut-parleur Jensen, on voit schématiquement que deux haut-parleurs travaillent en doublet acoustique et sont montés sur des baffles, alors que le haut-parleur recevant le signal monaural est monté enceinte close. Il y a bien sûr d'autres variantes possibles. L'idée de produire un signal stéréo à partir d'une source centrale est particulièrement avantageuse pour l'utilisation sur des appareils de petit volume.

La firme japonaise Sony par exemple, s'était inspirée de la méthode Jensen en

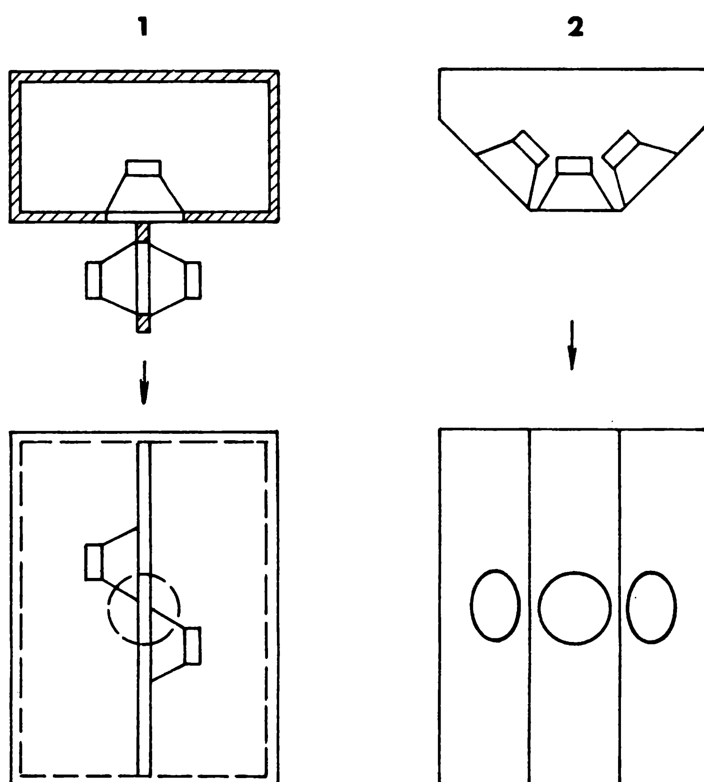



*Fig. 239 : Enceinte stéréophonique (une seule enceinte est nécessaire) Jensen, utilisant trois haut-parleurs. En 1 la version originale, en 2 une version améliorée.*

utilisant également une matrice et quatre haut-parleurs (dont deux montés en parallèle), placés comme sur la figure 240.

Cette méthode pratique permet d'écarter les haut-parleurs émettant le signal de différence G — D. Ceci était également un but recherché par Sony qui désirait adapter ce principe sur les combinés radio/cassettes.

Normalement, les trois signaux devraient partir d'un seul point. Ce point est, en fait, élargi ici par l'utilisation de deux haut-parleurs reliés en parallèle. Sur la figure 240 on constate cependant un point assez gênant concernant la matrice. Un transformateur spécial est nécessaire sur chaque voie, possédant des secondaires isolés de la masse. Ceci rend une telle adaptation impossible à partir d'amplificateurs courants.

Une autre solution (de l'auteur), donnant de très bons résultats expérimentalement, consiste à adopter une matrice et une dispersion des haut-parleurs semblable à celle de la figure 241. Le mode de branchement (avait déjà été utilisé pour la pseudo-quadriphonie du genre Hafler) permet d'obtenir la somme des signaux sur un haut-parleur (D + G) et la différence sur les deux autres (G — D), — (G — D). Les haut-parleurs sont placés d'une façon différente des deux autres solutions précédentes : aussi rapprochés que possible (ce qui limite le diamètre maximum de chacun des haut-parleurs de 10 à 13 cm de diamètre), ils forment un angle de 135° les uns par rapport aux autres. Les haut-parleurs recevant le signal de différence

(G — D) sont placées en conséquence à 90 ° l'un par rapport à l'autre. Cette disposition permet d'obtenir un très bon élargissement des sources fictives. L'élargissement maximum des sources sonores gauche et droite demande l'ajustage de niveau du haut-parleur central ainsi que celui de sa position en profondeur. Bien réglé, il permet à un son passant progressivement de la gauche à la droite, de ne pas être sujet à un phénomène de « trou central » ou d'augmentation de niveau pour un signal venant du milieu. A cet effet, l' atténuateur à impédance constante est utilisé. Bien que non commercialisé, ce système mettant à profit les techniques des mini-enceintes (devenues très en vogue depuis quelques années) permet de réaliser une enceinte stéréophonique de petites dimensions.

On a souvent critiqué l'enceinte Jensen et ses dérivés comme donnant un effet stéréophonique soit instable soit imparfait. La position d'écoute serait également très critique. A ce sujet, la méthode appliquée par Sony représente malgré tout un bon compromis. Il en est de même pour la troisième solution, plus pratique, et aussi

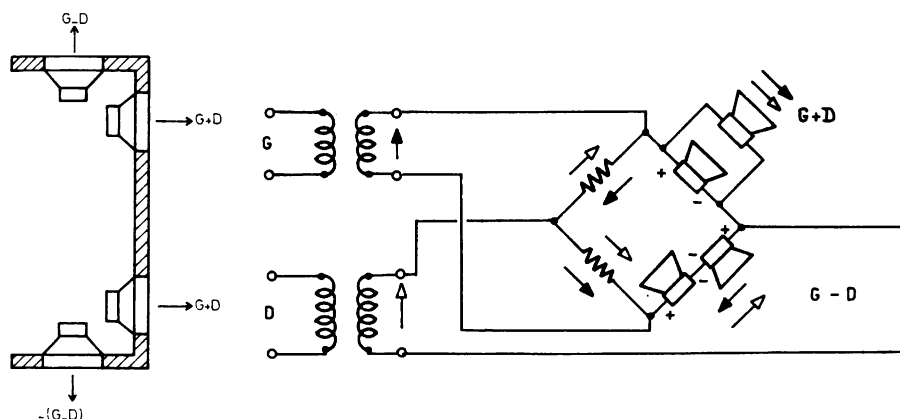



*Fig. 240 : Variante de l'enceinte à matrice stéréophonique Jensen, mettant en œuvre quatre haut-parleurs (dont deux montés en parallèle). (Sony, Japon, 1973).*

efficace. Sur toutes ces méthodes créant dans l'espace des sources fictives, le bruit de surface ou le bruit de fond n'entrent pas dans la matrice de codage et ceux-ci seront donc entendus comme venant directement des haut-parleurs. C'est, en fait, un avantage. Noter que la troisième méthode proposée peut également être appliquée à la quadriphonie, avec deux enceintes placées dans l'axe de l'auditeur (figure 242).

En partant toujours de la troisième méthode, il est possible de placer un système quadriphonique en croix (au lieu de le disposer en carré) et de créer aussi quatre sources fictives (figure 243). Ceci permet de créer une source fictive d'une ouverture de 360°. Pour en revenir aux solutions proposées ci-avant, des variantes ont été utilisées au Japon sur les téléviseurs, depuis la mise en service récente (1979) d'émissions télévisées, diffusées en stéréophonie (système multiplex), les haut-parleurs étant dans une seule enceinte.

Lors d'un signal monaural appliqué aux deux amplificateurs, seul le haut-parleur envoyant le signal monaural travaille, vu que les différences G — D sont nulles. On peut également utiliser d'autres procédés ayant recours à une manipulation de la phase ou aux lignes de retard, à l'exemple de la « fausse » quadriphonie. Ces procé-

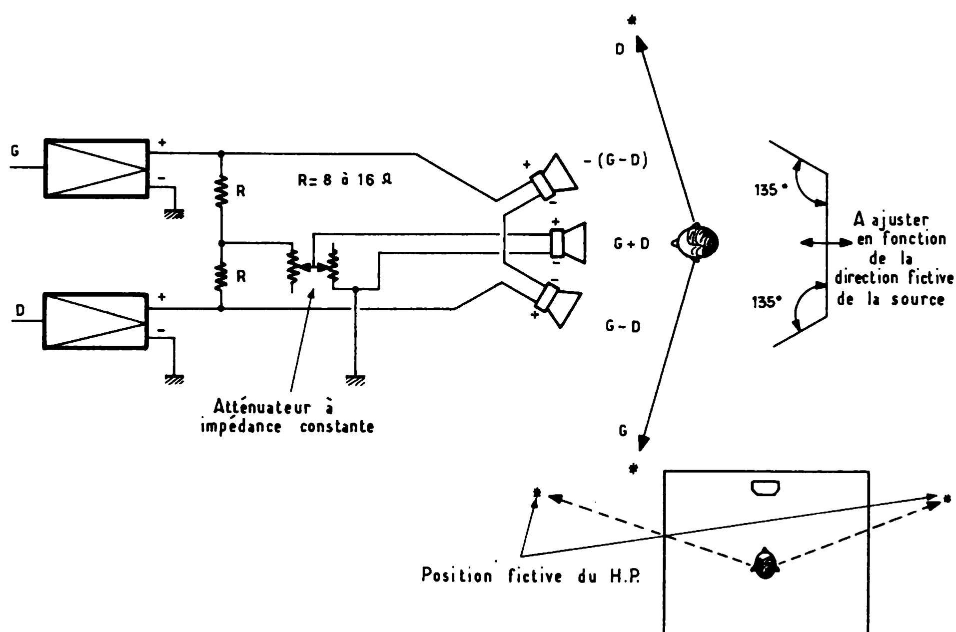



*Fig. 241 : Version améliorée de l'enceinte stéréophonique à trois haut-parleurs. La disposition des haut-parleurs est comme en 2, sur la fig. 239. (Hiraga, 1973).*

dés, utilisés notamment sur quelques récepteurs portatifs stéréophoniques (radio-cassettes de qualité), permettent d'élargir notablement l'angle d'écoute tout en n'utilisant que deux haut-parleurs.

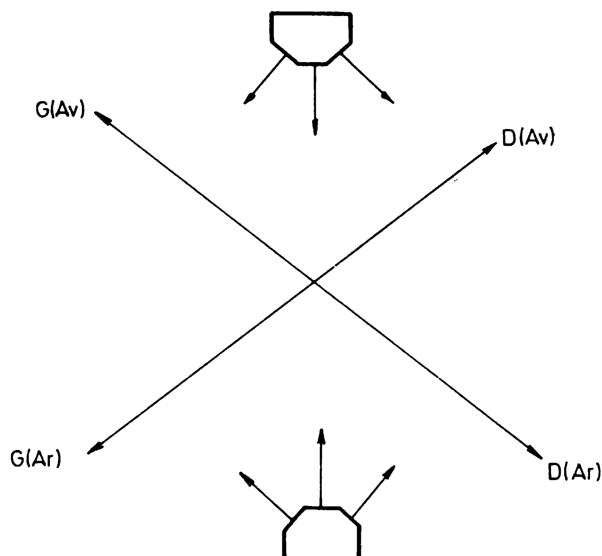



*Fig. 242 : Adaptation à la quadriphonie de l'enceinte décrite sur la fig. 241.*

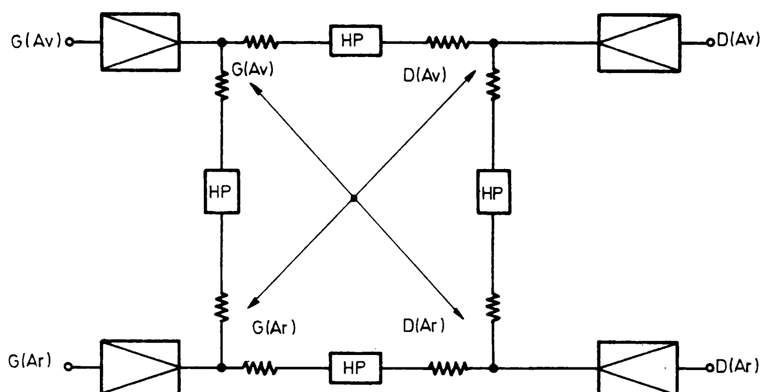



*Fig. 243 : Matrice quadriphonique à sources fictives. Le retour du signal (masse) est commun pour les enceintes comme pour les amplificateurs, ce qui permet d'utiliser des amplificateurs conventionnels.*

## L'enceinte TQWT

C'est une enceinte ancienne, peu connue, mais dont le nom revient de temps à autre. Elle peut donner de bons résultats si elle est bien réalisée.

Cette enceinte n'est pas du principe bass-reflex ou labyrinthe, mais rayonne par ses deux faces. La face avant rayonne directement tandis que la face arrière est chargée par un tube (une sorte de tuyau). Néanmoins, la figure 244 montre qu'il s'agit plutôt d'un tube évasé réglé en quart d'onde, d'òu son nom anglais TQWT (Tapered Quarter Wave Tube).

L'idée remonte à Paul Voigt, une importante autorité en électro-acoustique, qui la propose en 1930, dans la revue Wireless World sous la dénomination « enceinte d'encoignure pour utilisation domestique ». En 1949, l'anglais Robert West la propose de nouveau et cette fois elle fut commercialisée par la firme Decca. En 1963, R.N. Baldock la redécouvre et la surnomme « Paraline ». Obtenant tant de succès elle se vendit dans plus de 3 000 foyers. Plus récemment, E. Michelsen la proposa de nouveau aux amateurs sous forme de « kit », dans Hi-Fi News, baptisée « Ace ».

Dans ce tube évasé, fermé d'un côté, ouvert de l'autre, la fréquence de résonance de la colonne d'air correspond à la longueur $l$ du tuyau à laquelle s'ajoute l'effet d'additions de l'embouchure (rayon × 1,7 dans le cas d'un cylindre) le tout donnant le système accordé au 1/4 d'onde, ce qui donne :

$$fo = \frac{34\,000}{4\,(l + e)}$$

ou $fo$ = fréquence de résonance ;
$l$ = longueur physique du tuyau (cm) ;
$e$ = correction d'embouchure (cm).

Dans cette enceinte l'impédance (à la fréquence de résonance) est élevée près de la gorge et basse près de l'embouchure. Le système travaille en transformateur acoustique, comme le ferait un haut-parleur à pavillon. Ce système s'oppose à l'enceinte de type « labyrinthe », principe ayant le défaut de créer des ondes stationnaires, dues aux parois parallèles et à l'amortissement élevé de l'onde arrière. Cette enceinte cherche à éviter ce défaut. Elle améliore le rendement, grâce à l'utilisation de l'onde arrière.

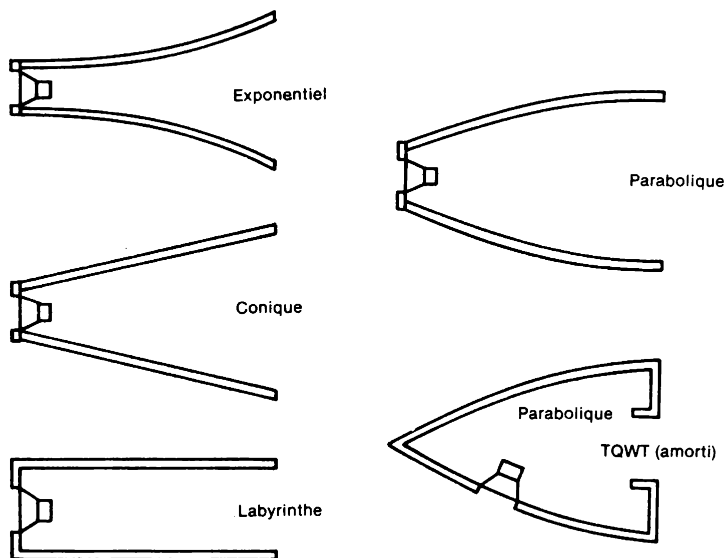



*Fig. 244 : Enceinte TQWT (Tapered Quarter Wave Tube). Principe de la charge dorsale, par rapport à d'autres procédés (exponentiel, conique, labyrinthe, parabolique).*

Dans le système QWT (Quarter Wave Tube) un tube cylindrique est utilisé alors que dans le système TQWT la surface de bouche (embouchure) est agrandie de 40 %. Ceci aura pour effet d'abaisser le cœfficient de surtension Q à la résonance. L'appelation Tapered Quarter Wave Tube en découle.

Le calcul de la distance *d* se détermine donc par la formule :

$$d = \frac{l}{2 + \sqrt{S_t / S_m}}$$

comme l'indique la figure 245. On remarque en fait que ce tube évasé est replié dans l'application pratique. Cette enceinte devrait donc être appelée « Folded TQWT ». Pour une enceinte ne dépassant pas 90 cm, la fréquence de résonance est de 48 Hz. 90 cm parait bien court, en tant que pavillon. Allonger la longueur de celui-ci, à l'exemple des enceintes à labyrinthe ( dont la longueur physique peut dépasser 3 m), est possible. Cependant, l'avantage d'une meilleure étendue de la bande passante dans le grave est presque toujours défavorisé par des effets subjectifs de trainage, de sons « longs à s'établir » (sans doute dus à la colonne d'air, que représente le volume arrière, mettant un certain temps à s'établir).

Les questions d'épaisseur des parois et de forme optimum de l'enceinte ont été sérieusement étudiées par plusieurs chercheurs, dont les japonais Shiyoya Dani (1973), K. Hata, S. Kuraüchi, ainsi que l'auteur de ce livre. Le rapport des dimensions, les problèmes de vibrations parasites des parois, d'épaisseur minimum de celles-ci, vis à vis des rapports de dimensions, ont été étudiées. De même, E. Michelsen et K. Shiyoyadani étaient par exemple, arrivés à obtenir un compromis remarquable du paramètre « TL » (Transmission Loss) (concerne la rigidité dynamique des parois et les meilleurs rapports rigidité/rapports de dimensions/épaisseur des parois), malgré des parois dont l'épaisseur ne dépassait pas 3 mm. Ce réglage, en vue d'une épaisseur minimum reste cependant délicat, car il doit être fait con-

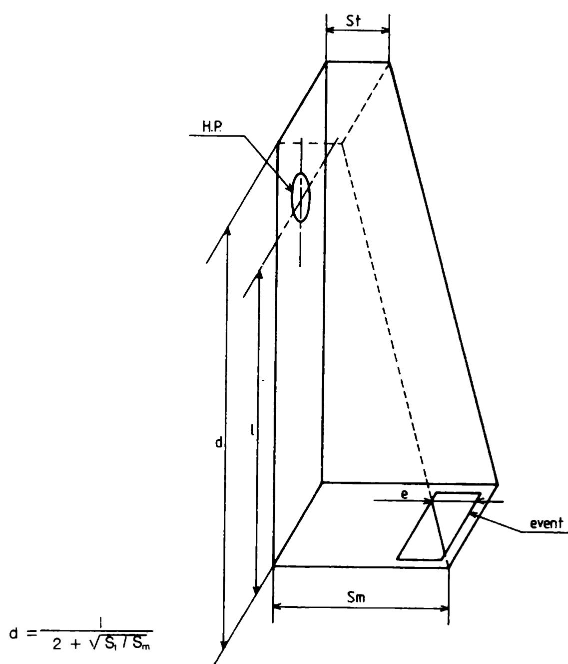



*Fig. 245 : Principe de l'enceinte TQWT.*

jointement par le calcul et par l'étude des modes de vibrations des parois. Sur les figures 246 et 247 on trouvera deux plans d'enceintes, dont une avait été décrite dans Hi-Fi News en 1972. L'autre concerne l'enceinte TQWT, la plus courante, dont

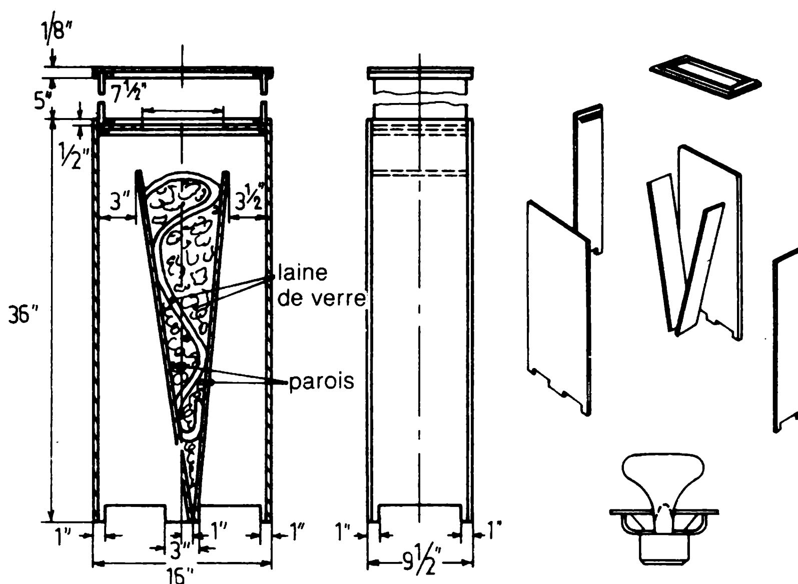



*Fig. 246 : Enceinte « Ace », double TQWT non amorti, décrite par E. Michelsen dans la revue anglaise Hi-Fi News en 1972. Le haut-parleur utilisé pour cette réalisation était le fameux « PM-6 », de Lowther.*

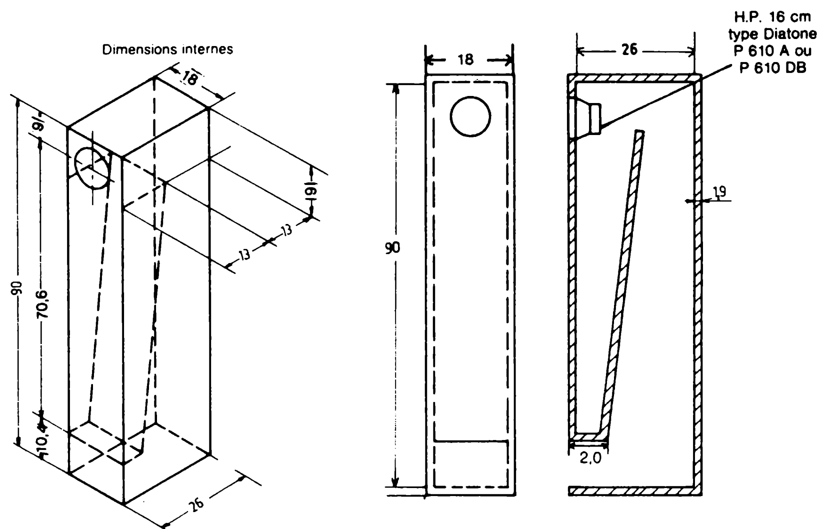



*Fig. 247 : Enceinte TQWT. La hauteur de l'évent était à l'origine de 10,4 cm, mais fut légèrement réduite par la suite. La fréquence de coupure pour les dimensions données sur la figure est de 48 Hz.*

les dimensions ont été optimisées. L'une d'elle était prévue à l'origine pour le haut-parleur anglais Lowther PM6 et l'autre pour plusieurs haut-parleurs japonais de diamètre 16 cm. Sur ce modèle, on remarque que l'évent est de hauteur 10 cm. Cette hauteur donne une caractéristique d'impédance d'allure proche d'une enceinte bass-reflex. En fait, sur de nombreux modèles commercialisés, cet évent a été plus ou moins réduit (hauteur de celui-ci) et la hauteur varie ainsi de 1 à 10 cm. Ce réglage se fait souvent « subjectivement », car certains haut-parleurs n'ont pas une suspension parfaitement étanche, faussant ainsi le réglage de l'évent. Ensuite, certains haut-parleurs solo, reproduisant la plus grande partie du spectre (soit 100 à 10 000 Hz), ont une fréquence de résonance parfois assez élevée (70 à 90 Hz) ; un réglage de l'équilibre subjectif, facteur très important, est donc nécessaire.

Sur la figure 248 on voit la photo d'une enceinte TQWT baptisée « Tallboy ». Elle fut commercialisée au Japon en 1974 par la firme Sunsey Co. Ltd. Elle utilisait pour le grave-médium un haut-parleur de 16 cm et pour l'aigu un tweeter électrostatique (décrit précédemment).

Cette enceinte, très simple de conception, est fort intéressante (volume, rendement, simplicité de la construction). Sa forme « colonne » permet de positionner le haut-parleur à une bonne hauteur par rapport à l'auditeur.

## L'enceinte Western Electric/Altec.

Cette enceinte de grand volume a été à l'origine conçue par Western Electric et reprise plus tard par Altec Lansing Corporation, une firme américaine ancienne et très connue. Dans sa version plus récente commercialisée chez Altec sous le nom « La Voix du Théâtre ». Elle obtint un succès énorme, qui reste d'ailleurs toujours actuel. Elle était prévue pour un haut-parleur de diamètre 36 à 38 cm, de résonance 20 à 30 Hz, de Qo = 0,18 environ. Plusieurs modèles se sont bien adaptés à cette enceinte de rendement très élevé : Altec 416, 416 8A, 416 8B, 416 8C, 515 B, 515 C, ainsi que d'autres modèles américains (JBL, Electro-Voice, Jensen, etc.) et anglais

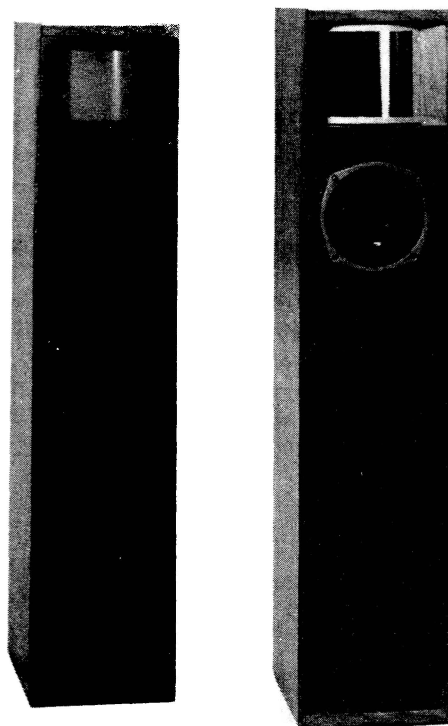


*Fig. 248 : Enceinte « Tall Boy », modèle original, commercialisé au Japon en 1974 par les firmes Sunsey Co. et Nippon Giken.*

(Goodmans, Tannoy, Vitavox, etc.). Le rendement très élevé est obtenu par l'adoption d'un court-pavillon chargeant frontalement le haut-parleur ainsi que par une enceinte de grand volume de type bass-reflex, utilisant un évent de grande surface. Le rendement, grâce aux haut-parleurs cités ci-dessus, voisine ou dépasse 100 dB/m/W et la réponse est remarquablement étendue dans le bas du spectre. Pour la version « La Voix du Théâtre » (enceinte exceptionnelle, mais destinée à la sonorisation, elle peut être utilisée en haute-fidélité. A cet effet, de nombreux utilisateurs (plus de 15 000 exemplaires au Japon) ont parfois modifié la taille de l'évent, ajusté le dosage du matériau amortissant et, surtout, rigidifié les parois (qui sont relativement fines sur les modèles d'origine). Il faut remarquer, au sujet de cette enceinte que les proportions de celle-ci, étudiées par la Western Electric, sont remarquablement proches du « nombre d'or », appliqué à l'acoustique. Ce nombre

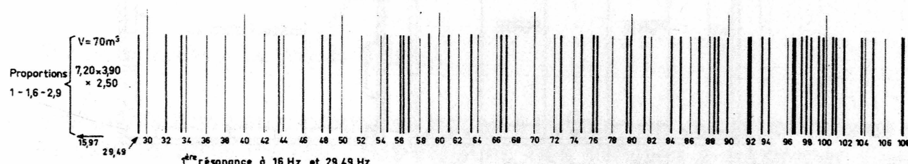



*Fig. 249 : Spectre de résonances dans une salle d'écoute dont les proportions sont proches du nombre d'or, soit des rapports 1 - 1,6 - 2,9. La salle était de dimensions 7,20 x 3,90 x 2,50 m. (P. Lucarain, Revue du Son, Aout-Septembre-Octobre 1973).*

d'or, qui est très largement utilisé dans les arts (architecture, peinture, etc.) est de valeur $(1 + \sqrt{5})/2$ ce qui donne 1,6180. Les rapports 1, 1,6, 2,6 en découlent. Appliquée à l'acoustique, cette proportion s'écarte quelque peu et donne, par exemple, 1, 1,56, 2,88. A ce sujet on peut se reporter à deux articles parus dans la Revue du Son (n° 244 - 245, août, septembre, octobre 1973) où P. Lucarain démontre qu'une pièce de 70 m³, de proportions 7,20 × 3,90 × 2,50 m donne une bonne répartition du spectre des résonances. Celui-ci est reproduit sur la figure 249 et cette méthode, utilisée pour les salles d'écoute, peut également s'appliquer aux enceintes acoustiques. Le rapport des dimensions est d'une importance capitale. En effet, un mauvais rapport de dimensions (hauteur/largeur/profondeur), ne peut être « rattrapé » par d'éventuelles corrections telles qu'un traitement absorbant interne. L'enceinte Western Electric/Altec est un bon exemple de cette application du nombre d'or en acoustique. Cependant, l'application n'est pas toujours parfaite et certains réglages restent à effectuer. Il est possible de perfectionner cette méthode et de rechercher des meilleures proportions. Celles-ci, basées sur les lois de Rayleigh, ont été étudiées, mises sur programme d'ordinateurs et appliquées avec succès par P. Hiraga et L. Fabrikant. Ces recherches concernent les proportions optimum des salles d'écoute, mais elles pourraient être étendues à celles des enceintes acoustiques.

Sur la figure 250 et 251 on trouvera ces deux modèles d'enceintes, ne variant que par leur évent [ la Western Electric ainsi que l'Altec (Voix du Théâtre) ]. Ils ont été



*Fig. 250 : Enceinte Western-Electric (Altec).*

réalisés par milliers par de nombreux amateurs. Le volume est important mais nécessaire pour l'obtention d'un bon rendement. Parmi celles décrites jusqu'ici, ce sont les plus importantes en volume. Celles-ci ont déjà été réalisées dans de plus petits volumes. Mais, rappelons nous ce que disait M. Iwata, le spécialiste des pavillons cité auparavant : « bien que l'on puisse faire des progrès en électro-acoustique, la longueur d'onde restera la même ». Concernant le rendement, une efficacité de 95 à 100 dB/m/W, tout à fait souhaitable vis-à-vis du respect de la dynamique, est compatible avec les amplificateurs de moyenne puissance. Plus loin, un abaque ( puissance de l'amplificateur/efficacité de l'enceinte/niveau acoustique) montre les impossibilités auxquelles on arrive, lors de l'utilisation d'enceintes de rendement inférieur à 90 dB. Ceci est d'autant plus grave que, si l'on se reporte au graphe niveau d'entrée/niveau acoustique du moteur Western Electric 555 W, on constate qu'au-dessous d'une certaine efficacité, il n'est plus possible de tenter d'effectuer une compensation d'un faible rendement par un amplificateur très puissant, ceci à cause de la saturation rapide du niveau acoustique. Dans les deux enceintes décrites ci-dessus, on doit constater un seul inconvénient, la distance très réduite entre le dos du haut-parleur et la paroi dorsale de l'enceinte.

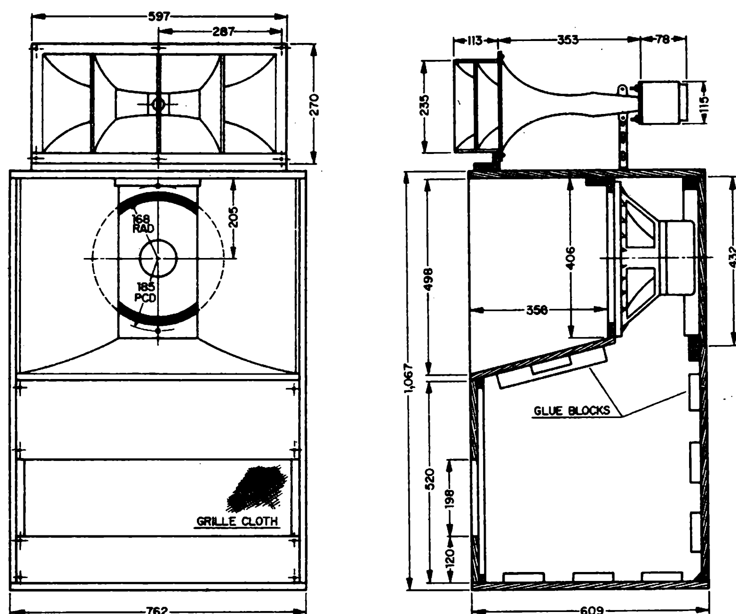



*Fig. 251 : Enceinte Altec « La Voix du Théatre ».*

Une enceinte trop peu profonde se traduit à l'écoute par des problèmes de résonances dans la zone médium, bas-médium, très difficiles à supprimer. Quant à l'enceinte Jensen/Onken décrite auparavant, celle-ci représente aussi un remarquable compromis rendement/volume/bande passante/distorsion.

## L'enceinte JBL Everest

La révolution de la stéréophonie, à la fin des années 50, suivie de son application en milieu domestique fit rapidement comprendre aux utilisateurs les inconvénients propres à ce nouveau principe de reproduction sonore : pour que l'auditeur puisse entendre les deux enceintes avec le même niveau sonore, celui-ci doit se placer à un point situé à égale distance des enceintes, c'est-à-dire sur le plan de symétrie formé par celles-ci. Il n'est pas toujours facile de respecter parfaitement cette condition dans le cadre d'une utilisation domestique. La présence de portes, de fenêtres, de meubles ainsi que des considérations pratiques et esthétiques sont autant de raisons pour ne pas être en mesure de pouvoir écouter de la stéréophonie dans des conditions optimales. Ensuite, même si ces conditions sont respectées, il faut avouer qu'il n'est pas très pratique d'être contraints de se placer les uns derrière les autres sur l'axe de symétrie. Si l'on est placé trop à gauche ou trop à droite de l'axe central d'écoute on peut toujours « rattraper » le déséquilibre de niveau résultant en actionnant la commande de balance, cette correction n'étant malheureusement valable que pour un seul auditeur. On peut encore, en rapprochant les enceintes l'une de l'autre, élargir plus ou moins la zone d'écoute stéréophonique optimale, ce qui est par contre au détriment de l'effet de largeur stéréophonique. D'autre part, les enceintes n'étant que rarement vraiment omnidirectionnelles, plusieurs auditeurs ne peuvent écouter une paire d'enceintes dans les mêmes conditions, un seul d'entre eux ayant la possibilité de les écouter dans des conditions optimales. En résumé, on bute sur deux problèmes : celui de la directivité des enceintes et celui de la variation du niveau acoustique lors du déplacement du point d'écoute. La firme JBL fut l'une des premières à concevoir une enceinte stéréophonique étudiée pour produire un effet stéréophonique constant. Il s'agit de la célèbre version « Paragon » des années 60 qui avait été principalement conçue pour le « monitoring » stéréophonique des studios d'enregistrement. L'orientation appropriée des haut-parleurs vers un panneau central curviligne assurait un effet stéréophonique constant, ceci même en dehors de l'axe central. C'est fin 1986 que JBL mettait au point et commercialisait une paire d'enceintes de forme asymétrique aux caractéristiques de directivité étudiées pour produire un effet « d'image stéréophonique constante ». Cette enceinte unique en son genre porte la référence Everest DD 55000. Son originalité mérite une description détaillée de son principe.

En théorie, il est facile de dire « qu'il suffit de modeler les caractéristiques de directivité des enceintes de telle façon qu'en se déplaçant de deux mètres vers la gauche, tout se passe comme si la paire d'enceintes se déplaçait elle aussi de deux mètres vers la gauche ». En pratique, on bute sur différents problèmes :

— Sur la majorité des enceintes, le son devient de plus en plus directif au fur et à mesure que la fréquence augmente.

— L'oreille possède un pouvoir de localisation des sources sonores qui, sur le plan horizontal, s'accroît aux fréquences élevées et s'amenuise aux fréquences graves.

— Sur la majorité des enceintes, la courbe de réponse niveau/fréquence varie selon des angles d'écoute compris entre 0 et 60°.

— Une paire d'enceintes omnidirectionnelles ne peut être utilisée pour les raisons indiquées ci-dessus.

— Sur l'ensemble des enceintes, la courbe de réponse niveau/fréquence, en dehors de l'axe, chute seulement au-dessus de quelques kilohertz, et non sur l'ensemble des fréquences.

Il semble impossible a priori d'atteindre le but recherché, c'est-à-dire un effet « d'image stéréophonique constante ». Pour accéder à cet objectif, il faudrait remplir des conditions assez paradoxales :

— En se plaçant au centre entre les deux enceintes et à 3 ou 4 mètres de celles-ci, il faudrait réunir les deux conditions de linéarité niveau/fréquence et d'équilibre de

niveau sonore entre les deux voies. C'est ce que l'on obtient d'habitude sur des enceintes conventionnelles.
— A partir des mêmes enceintes et en se plaçant cette fois devant l'enceinte gauche, le niveau acoustique devrait diminuer d'intensité sur l'enceinte gauche et augmenter sur l'enceinte droite de façon à produire une impression subjective de même niveau acoustique. A partir de cette position asymétrique, la linéarité de réponse niveau/fréquence devrait rester parfaite pour les deux enceintes. Pour des enceintes conventionnelles et en tournant la commande de balance vers la droite, on pourrait trouver une position procurant une sensation de niveau sonore identique pour les deux enceintes. Pour l'enceinte droite, une bonne linéarité ne pourrait être obtenue qu'en dirigeant celle-ci vers le point d'écoute.

Les conditions d'équilibre de niveau subjectif des deux enceintes et de linéarité ne pourraient donc être remplies que pour un seul auditeur et à un point d'écoute bien déterminé. En se référant à la condition indiquée ci-dessus (auditeur placé devant l'enceinte gauche, commande de balance augmentant le niveau réel sur l'enceinte droite, cette dernière dirigée vers le point d'écoute), deux autres auditeurs placés au centre et à droite n'entendraient que l'enceinte droite ou presque, ceci sous un angle d'écoute produisant une chute de niveau aux fréquences élevées, à partir de 3 ou 4 kHz.

C'est un problème qui paraît insoluble, du moins en apparence, auquel il faut ajouter l'effet Haas, l'effet de précédence. Il s'agit d'une sorte d'effet de priorité d'information de direction et de localisation des sons émis par la source la plus proche de l'auditeur, un effet qui persiste sur les signaux transitoires, ceci même si l'auditeur entend les deux enceintes, avec le même niveau sonore.

Un autre problème lui aussi pouvant être considéré comme insoluble est celui du mélange des canaux par effet acoustique et inter-aural. L'oreille gauche entend les sons provenant de l'enceinte gauche mais aussi ceux provenant de l'enceinte droite, avec un petit décalage temporel et vice-versa. L'écoute d'une source stéréophonique, à l'aide de nos deux oreilles, en binaural, introduit des phénomènes d'addition ou de soustraction des signaux, produisant une courbe de réponse niveau/fréquence en forme de « peigne » formée de bosses et de creux de plus en plus serrés aux fréquences élevées. Phénomène inévitable auquel il faut ajouter les perturbations apportées par les réflexions secondaires des sons émis par les enceintes sur le mur, le sol et le plafond.

L'effet d'« image stéréophonique constante » des enceintes JBL DD 55 000 Project Everest a été obtenu grâce à l'application simultanée de trois principes :
— l'orientation des haut-parleurs ;
— la caractéristique de directivité asymétrique des enceintes ;
— la courbe de réponse du filtre passif trois voies.

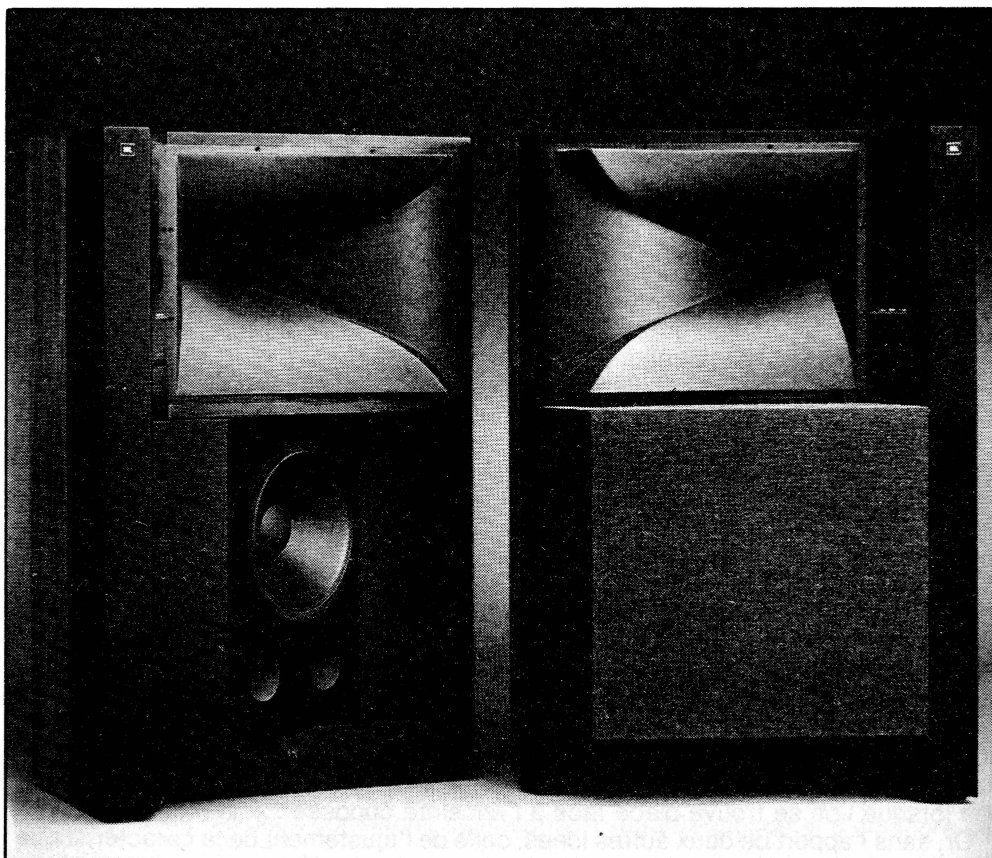
Tout d'abord, les haut-parleurs ne sont pas orientés vers l'auditeur ou dans une direction parallèle aux murs latéraux mais vers un point situé nettement en avant de l'auditeur. Les haut-parleurs graves sont orientés vers le centre selon un angle de 30° chacun. Il en est de même pour les voies de médium. Les pavillons utilisés, de référence 2342 ont une forme très fortement asymétrique. Quant aux tweeters, ceux-ci sont dirigés vers le centre, mais sous un angle encore plus prononcé de 60°. Un auditeur placé devant l'enceinte gauche et à quelques mètres de celle-ci se trouvera donc positionné très nettement en dehors de l'axe de ses haut-parleurs : 30° pour les voies grave et médium, 60° pour le tweeter. En se plaçant à la même distance des enceintes mais cette fois devant l'enceinte droite, l'auditeur percevra l'enceinte gauche sous un niveau acoustique plus élevé. C'est un résultat paradoxal, contraire à la logique qui voudrait que le niveau acoustique maximal soit obtenu lorsque l'on est placé face à l'enceinte émettant le son en question et non pas lorsque l'on se trouve placé face à l'enceinte opposée.

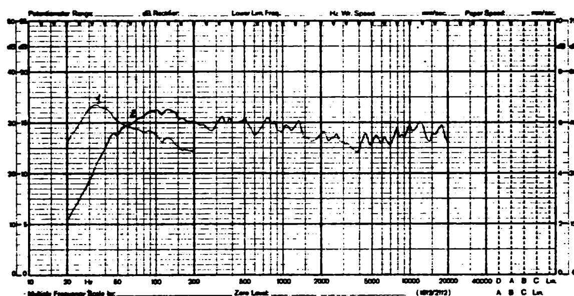
Or, sans l'apport de deux autres idées, celle de l'ajustement de la caractéristique

de directivité asymétrique et celle du réglage de la compensation de chute de niveau en dehors de l'axe des haut-parleurs, un tel système aurait été inutilisable en stéréophonie. Le tweeter, écouté sous un angle d'incidence latéral de 90° produirait, à 20 kHz et par rapport à sa fréquence de coupure (6 à 8 kHz en général), une chute de niveau de l'ordre de 15 dB. Il en serait de même pour une voie de médium à chambre de compression et à pavillon de forme conventionnelle, la chute de niveau à 7 ou 8 kHz pouvant être estimée à 10 ou 15 dB par rapport à 600 ou 800 Hz.

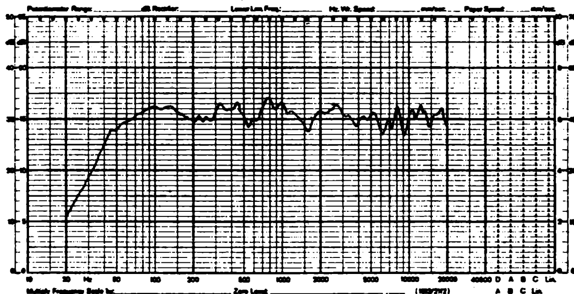
La première approche effectuée par JBL a été de chercher à obtenir un niveau stéréophonique constant, quelle que soit la position de l'auditeur, au centre, à gauche ou à droite devant les enceintes, ce qui a conduit à cette orientation particulière des haut-parleurs vers un point situé nettement en avant de l'auditeur. Un pavillon de médium de forme conventionnelle ne pouvant être en mesure d'apporter les résultats escomptés, JBL a donc mis au point, grâce à ses ingénieurs et aux calculs assistés par ordinateur un pavillon de forme asymétrique, l'ensemble moteur + pavillon produisant, sous des incidences variant entre 0° et plus de 60°, la même linéarité de réponse mais un niveau décroissant régulièrement sous des incidences de plus en plus prononcées.

La première optimisation a donc consisté à ajuster ces deux paramètres de façon à produire un effet de balance stéréophonique presque totalement indépendant de la position d'écoute. La seconde optimisation a servi à effectuer des corrections au niveau du filtre, de façon à compenser les chutes de niveau se produisant sur chacun des haut-parleurs écoutés hors axe. Sur la voie grave, la chute de niveau intervient au-dessus de 100 Hz mais reste faible, de quelques dB jusqu'à la

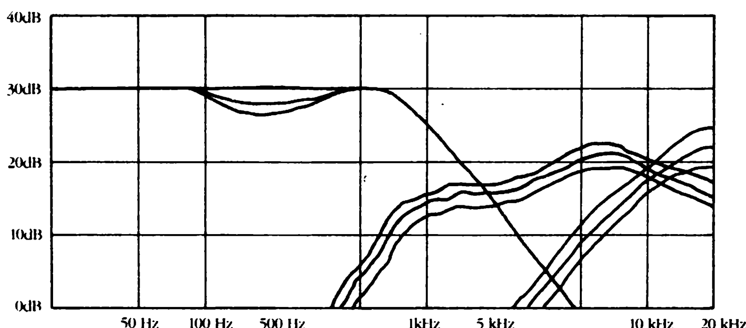




*Courbe amplitude-fréquence dans l'axe à 1 m de 200 Hz à 20 kHz et à proximité de 20 à 200 Hz, en 1 de l'évent et en 2 du haut-parleur grave.*



*Courbe amplitude-fréquence à 30° dans les mêmes conditions que dans l'axe. Etant donné la forme du pavillon et la position du tweeter et du haut-parleur grave, il ne faut pas s'étonner de trouver une courbe meilleure que dans l'axe et sans affaiblissement dans l'aigu.*




*Caractéristiques du filtre (mesure en tension) de l'enceinte JBL Everest. Remarquer les corrections de niveau effectuées au niveau du médium et de l'aigu.*

fréquence de coupure choisie qui est ici de 850 Hz. La correction effectuée consiste à creuser la zone de fréquences comprises entre 100 et 500 Hz. Pour la voie médium et dans la bande utile (850 Hz-7,5 kHz), la correction réside à relever d'une valeur proche de 8 dB la fréquence la plus élevée et de creuser légèrement la zone comprise entre 1,2 kHz et 5 kHz. L'orientation du tweeter implique une compensation plus forte, soit un relevé de niveau proche de 12 dB/octave. Après optimisation finale, JBL a obtenu un filtre passif aux caractéristiques fort curieuses que l'on trouvera sur la figure ci-dessus. Chacune des trois voies comporte des corrections à 3 positions, celles-ci étant destinées à une optimisation de l'équilibre subjectif dans différents milieux acoustiques.

La courbe de réponse niveau/fréquence globale obtenue montre, par sa très étonnante linéarité le degré de perfection de cette mise au point, la linéarité restant la même pour les angles variant entre 0° et près de 90°, ceci même au-dessus de 15 kHz. Le résultat ainsi obtenu est celui de l'« image constante », d'une linéarité de réponse, d'un équilibre de niveau sonore entre les voies pouvant être considéré comme indépendant de la position d'écoute. La compensation de l'effet de précédence (qui tend à donner une information de direction pour la source la plus proche) est obtenue par une orientation appropriée du tweeter.

Le procédé de l'« image constante » mis au point par JBL représente le plus grand pas en avant réalisé jusqu'ici dans l'application pratique de l'écoute stéréophonique. La surface d'écoute à l'intérieur de laquelle on obtient un effet stéréo équilibré et la meilleure caractéristique de linéarité se trouvent considérablement élargies. On résoud donc le problème de l'écoute collective en stéréophonie et de la position d'écoute optimale qui n'est plus un point bien précis situé à égale distance des enceintes mais qui devient une vaste surface.

La DD 55 000 Project Everest pèse 140 kg, mesure 141 cm de haut et 34,5 cm de profondeur. La largeur de l'enceinte est de 91 cm. La face avant n'est pas plane. Le haut-parleur grave est monté sur une surface rapportée et orientée de 30° vers le centre de la pièce. Le pavillon, dont l'embouchure mesure 67 × 54 cm est de forme très asymétrique sur le plan latéral. Sur sa plus grande longueur, il mesure près de 73 cm, tandis qu'il ne mesure qu'environ 30 cm sur le côté latéral le plus court.

Le tweeter est orienté de 60° vers le centre. L'enceinte est divisée en deux parties, l'une étant réservée à la voie grave, l'autre étant consacrée au pavillon de médium et au filtre. Le caisson grave est de type bass-reflex optimisé et la courbe d'impédance montre un accord parfait vers 40 Hz, avec deux résonances d'égale amplitude situées aux environs de 20 Hz et de 55 Hz.

Le haut-parleur grave, de diamètre 38 cm et de référence 150-4H, utilise une membrane légère à génératrice droite (rarement rencontrée aujourd'hui). La suspension est en tissu rapporté, à petits plis et la fréquence de résonance est assez élevée, de l'ordre de 40 Hz. Pour la voie grave, JBL a cherché à obtenir des performances très poussées en réponse transitoire, en rendement et aussi en admissibilité maximum en puissance. 100 dB/m/W, une réponse parfaitement linéaire entre 40 et 800 Hz, près de 250 W admissibles, sont des chiffres éloquents à ce sujet. Ce haut-parleur pèse 10,3 kg et utilise une bobine mobile de 100 mm avec fil plat en cuivre.

La voie médium est confiée au moteur 2425 H (moteur 1 pouce). La membrane en titane est équipée d'une bobine de 45 mm de diamètre en fil plat d'aluminium. La bobine plonge dans un entrefer dont la densité de flux est de 1,8 T (18 000 gauss) et le rendement de cette chambre de compression atteint 110 dB/m/W. Le moteur 2425 H est associé au pavillon 2346-1, lequel est réalisé en matière moulé à dos nervuré et amorti acoustiquement.

Le tweeter est le fameux 2405 H à membrane annulaire et à bobine de 45 mm de diamètre, la pièce de phase ayant une forme rectangulaire à extrémité effilée.

Le filtre, très complexe, comporte plus de 35 composants passifs. Celui-ci est placé à l'arrière du pavillon. Il est relié aux trois haut-parleurs ainsi qu'à trois réglages à trois positions pour chacune des voies. C'est grâce au rendement très élevé des voies de médium et d'aigu que, malgré l'insertion des circuits passifs de compensation, JBL a pu obtenir un rendement global de 100 dB/m/W.

La bande passante très étendue présente dans l'axe un profil régulier avec une très légère dépression dans le haut-médium autour de 3 000 Hz − 3 à − 4 dB. Le niveau dans le grave reste impressionnant avec le 40 Hz à − 4 dB et surtout un évent particulièrement bien accordé qui renforce par exemple le 30 Hz de + 2 dB ! A 30° la courbe ne change absolument pas, même dans l'aigu. L'étude soignée du pavillon ainsi que la position du tweeter et sa directivité bien contrôlée jouent pleinement leur rôle.

## Disposition des enceintes

La disposition des enceintes dans le local d'écoute aborde un autre problème : l'acoustique du local d'écoute. Cette question est si vaste qu'elle ne pourrait être traitée que dans un livre entier. Il ne sera question ici que des problèmes les plus élémentaires de positionnement de l'enceinte dans la pièce, en hauteur ou par rapport aux murs.

### 1 - Position en hauteur du haut-parleur de grave.

La réflexion du sol provoque une remontée de niveau des sons graves. Dans la plupart des cas, elle n'est pas souhaitable et subjectivement, une distance relativement éloignée du sol est préférable. La figure 252 donne un exemple de cet « effet de sol ».

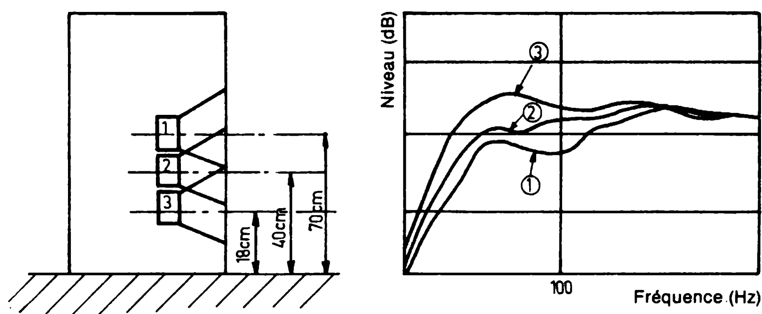



*Fig. 252 : Effet de sol d'une enceinte sur laquelle la hauteur du haut-parleur varie par rapport au sol. Influence sur la courbe amplitude / fréquence.*

### 2 - Effet de mur dorsal.

La figure 253 montre « l'effet de mur » d'une façon schématique. Lors de mesures sur différentes enceintes, il existe des dispersions importantes, et cette figure montre une moyenne très générale, ce qui donne un relevé maximum de 6 dB à la fréquence de coupure.

### 3 - Effet de baffle

La figure 253 bis montre cet effet faisant remonter le niveau à environ 6 dB à la fréquence de coupure. La méthode du baffle infini (trou dans le mur) est excellente, et peut donner de très bons résultats (mesure comme écoute).

### 4 - Sur le sol, contre le mur ou près de celui-ci.

Ceci peut donner un relevé de 6 à 12 dB, combinés aux effets combinés de mur (effet de baffle) et de sol (effet de sol).

### 5 - En encoignure.

Cette méthode a été longtemps préconisée par plusieurs constructeurs. De nombreuses enceintes acoustiques sont prévues pour travailler en encoignure. Ces enceintes ont le plus souvent une section triangulaire ou presque, afin d'être placées en encoignure, (fig. 254). Combinant les effets de baffle de deux murs, ainsi que celui du sol, le relevé de niveau acoustique à la fréquence de coupure peut aller

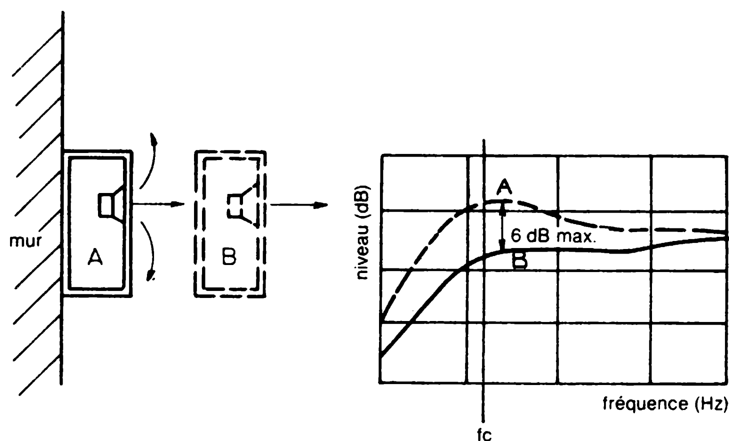



*Fig. 253 : Effet de mur.*

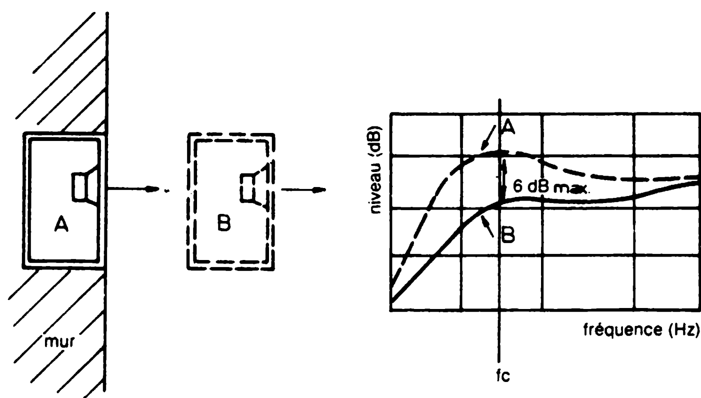



*Fig. 253 bis : Effet de baffle (enceinte encastrée dans le mur).*

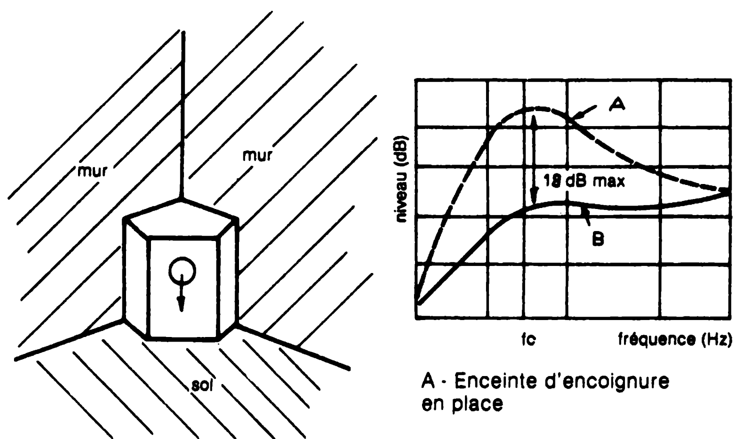



*Fig. 254 : Effet d'encoignure.*

jusqu'à 18 dB. Certains systèmes sont étudiés pour ne fonctionner qu'en encoignure, comme par exemple les enceintes Klipsch. Selon Paul Klipsch, réputé pour ses nombreux travaux dans le domaine des enceintes de haut rendement, des pavillons, l'avantage du placement en encoignure serait, à part le relevé de niveau dans le grave, une meilleure image stéréophonique, une meilleure homogénéité dans la répartition du niveau subjectif pour les points situés entre les deux haut-parleurs. Cette solution était également préconisée par Gilbert A. Briggs.

A l'opposé, d'autres enceintes peuvent donner de moins bons (ou même mauvais) résultats, si elles sont placées en encoignure. Tout cela est surtout une question de type d'enceinte, d'adaptation à la forme et au volume de la pièce d'écoute et, surtout une question d'équilibre subjectif en fonction des caractéristiques acoustiques de cette pièce d'écoute.

**Courbes de réponse typiques.**

Celles-ci sont très schématisées et concernent la majorité des enceintes acoustiques. Sur la figure 255 on trouve en A un courbe linéaire dont le bas peut chuter plus ou moins rapidement. Dans l'aigu, il n'est pas fait état des chutes de niveau dues à la directivité. Sur des enceintes de grand volume et malgré la parfaite linéarité, cette courbe peut se traduire subjectivement par un grave relevé.

A ce propos, il était question autrefois de l'équilibre tonal, et de la loi des

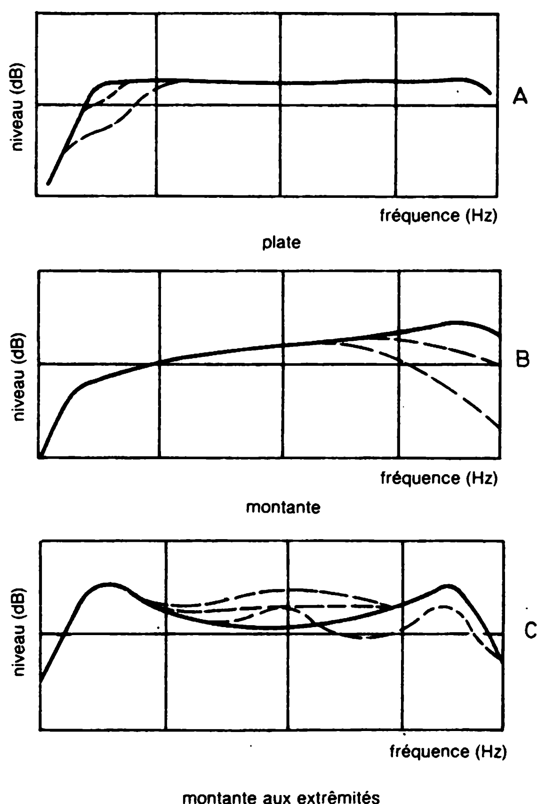



*Fig. 255 : Courbes amplitude / fréquence typiques rencontrées sur les enceintes acoustiques. Les allures de celles-ci sont ramenées à trois variantes principales.*

« 400 000 », 20 × 20 000 étant l'idéal. Ceci est assez empirique, mais il est certain qu'il est préférable de connaître la limite à donner à l'aigu par rapport à celle du grave, ceci lors de l'élaboration d'une enceinte acoustique. En général, on pourrait dire, avec quelques réserves, que l'équilibre tonal est subjectivement excellent pour des bandes de :

20 — 20 000 Hz (perte subjective 0 %)
40 — 15 000 Hz (perte subjective 1 %)
70 — 12 000 Hz (perte subjective 3 %)
80 — 9 000 Hz (perte subjective 6 %)
100 — 6 000 Hz (perte subjective 14 %)
220 — 3 500 Hz (perte subjective 50 %)
270 — 3 000 Hz (perte subjective 60 %)

Toujours sur la figure 255, on voit, en B, une courbe montante pour laquelle, aux fréquences de coupures basse et aigüe, la chute peut être forte, moyenne ou faible. Cette courbe légèrement « montante » se révèle très souvent « équilibrée » sur le plan de la balance subjective, dans une pièce d'écoute courante.

Ceci s'explique par l'écoute en local domestique, qui présente toujours des résonances marquées entre 20 et 200 Hz. Le placement de l'enceinte près du sol et des murs y contribue, tout cela apportant la compensation subjective constatée.

En C, on trouve une autre courbe, schématisée mais se rencontrant assez couramment sur les enceintes trois voies. Deux résonances sont visibles, précédées ou suivies d'une coupure (grave ou aiguë) ainsi qu'une remontée en « dos d'âne », zone où travaille le haut-parleur de médium.

Les autres courbes découlent plus ou moins de ces courbes A, B et C.

**Vibrations parasites, construction.**

Pour clore ce chapitre sur les enceintes acoustiques, il est nécessaire de parler également du côté pratique. C'est-à-dire du bois, des matériaux composant l'enceinte. Pour des raisons commerciales qui semblent avoir marqué de plus en plus profondément l'auditeur au cours des années, l'enceinte acoustique réduit peu à peu en volume et en poids. L'efficacité dans le grave, la distorsion (dans de nombreux cas) et la qualité de reproduction chutent proportionnellement.

Il est assez évident de comprendre que les enceintes à parois sablées (doubles parois, dont l'espace entre celles-ci est rempli de sable sec), les grosses enceintes d'encoignure réalisées en briques, telles que celles préconisées par G.A. Briggs ne représentent aucun intérêt commercial. De même, pour une question de prix de revient, les parois sont en général réalisées dans des matériaux économiques : parois de faible épaisseur, matériaux de qualité moyenne ou mauvaise. Quelques compromis consistent à utiliser des matériaux divers, mélangés, souvent « recyclés » et agglomérés à l'aide d'une colle appropriée. Cela donne un aggloméré facile à travailler, donnant une excellente finition, n'abimant pas trop les scies (un point qui n'est pas négligé par le constructeur) et qui peut, malgré tout, présenter des caractéristiques mécano-acoustiques intéressantes.

Avant d'entrer dans le sujet des vibrations parasites, phénomène dont l'influence sur le son reproduit est très importante, il convient de dire auparavant que l'amplitude de déplacement de la membrane diminue rapidement lorsque la fréquence augmente. Ceci est mis en évidence par la figure 256 où on constate que, pour un cas donné, l'amplitude de déplacement, de 1 mm à 100 Hz passe à une valeur de l'ordre de 50 microns entre 6 et 20 kHz. Sur une chambre de compression, celle-ci est encore beaucoup plus réduite, ce qui montre combien il est important d'amortir au mieux les résonances parasites.

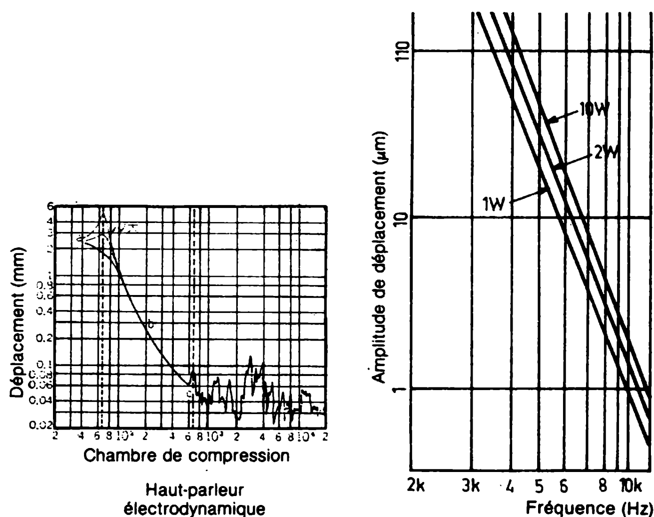



*Fig. 256 : Amplitude du déplacement de l'équipage mobile, en fonction de la fréquence, pour des haut-parleurs électro-dynamiques ou à chambre de compression. On voit que, dans les deux cas, l'amplitude de déplacement est comprise entre des fractions de microns et quelques dizaines de microns, pour des fréquences supérieures à 300 Hz. D'où l'importance des vibrations parasites, de la rigidité des parois consituant l'enceinte acoustique et de la masse de ces parois. La surface totale des parois de l'enceinte est beaucoup plus grande que la surface rayonnante du haut-parleur, ce qui amplifie encore ce phénomène.*

La figure 257 montre des exemples de résonances parasites constatées sur des enceintes courantes. Remarquer l'importance des résonances parasites entre 100 et 1 500 Hz, zone relativement sensible à l'oreille.

On essaie souvent de remédier à ces résonances, dues à l'onde arrière, ou à une

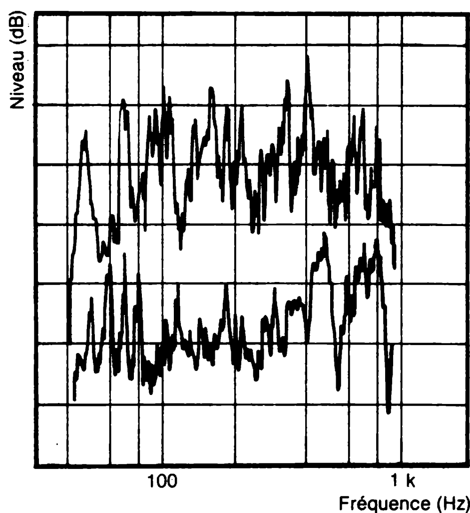



*Fig. 257 : Mise en évidence des résonances de parois. L'amplitude de ces vibrations parasites peut atteindre plusieurs dizaines de microns à des fréquences relativement élevées. En haut, une paroi courante. En bas, la même paroi rigidifiée (tasseaux).*

transmission à partir du châssis du haut-parleur, à travers les 6 parois de l'enceinte. Des parois plus épaisses, plus rigides, peuvent améliorer les résultats dans le premier cas. Une face avant plus épaisse, massive et très rigide, ainsi qu'un châssis plus lourd, peuvent améliorer les résultats dans le second. Sur les haut- parleurs à pavillon, la même remarque est à faire pour les matériaux composant le pavillon, d'autant plus que le pavillon amplifie acoustiquement ces défauts et que l'amplitude de déplacement de la membrane n'est en moyenne que de 1 à 2 microns (à 10 kHz).

De nombreuses méthodes permettent de mettre en évidence ces vibrations parasites : poudre de lycopode, talc, sable fin, examen stroboscopique « figeant » la fréquence analysée, système à interféromètre à laser, capteur de vibrations (accéléromètre), capteur de variations de distance (système capacitif, à radar, etc.). Il est important non seulement de réduire les résonances gênantes, mais aussi d'égaliser les niveaux respectifs de celles-ci. Des matériaux très durs sont parfois utilisés (céramiques, céramiques moulées sous pression, béton moulé, verre, matière plastique très dure, bois très dur imprégné de résine époxy etc.). Ceux-ci, comportant un indice de réflexion élevé, un indice d'absorption faible, ont souvent tendance à reporter vers le haut ces résonances parasites. Les mesures donnant souvent une amplitude relativement faible, le comportement vibratoire semble préférable pour des matériaux plus mous. En fait, il faut penser que le déplacement des résonances vers des fréquences plus élevées est fortement défavorable. Ceci s'explique par l'examen de la figure 256, où l'on constate que l'amplitude de déplacement de la membrane baisse très rapidement avec l'augmentation de la fréquence. Ceci explique assez facilement l'effet subjectif de telles enceintes, l'impression de résonances dans la zone médium ou aiguë. Par contre, dans le grave, le comportement de ces parois est souvent excellent voire même remarquable.

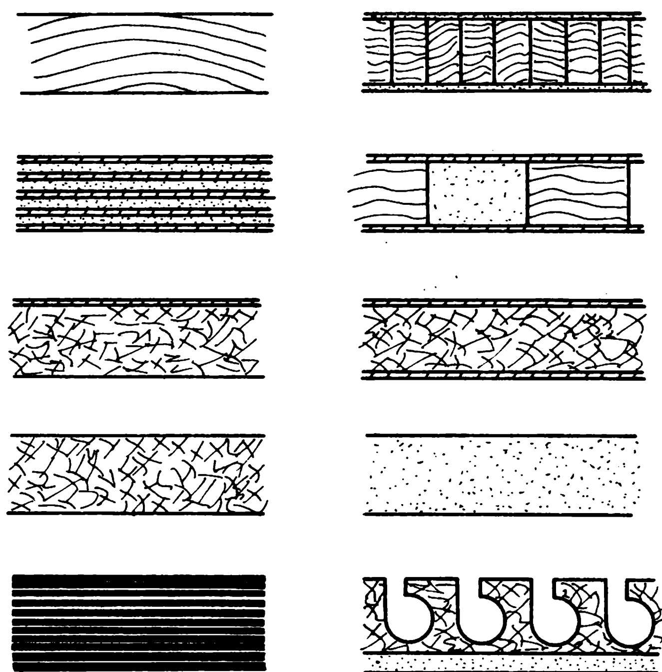


*Fig. 258 : Quelques variétés de bois, utilisées pour la construction des enceintes acoustiques : bois plein, bois plaqué, bois aggloméré, bois latté, bois aggloméré plaqué, bois imprégné finement latté, bois rainuré, etc.*

La solution de la paroi sablée est excellente, mais onéreuse et peu pratique. On peut aussi utiliser un matériau « sandwich », dont les couches extérieures sont dures et massives et la couche intérieure plus molle. Une autre solution consiste à isoler mécaniquement le caisson de médium (particulièrement sensible à ces vibrations), du reste de l'enceinte.

On peut encore découpler mécaniquement le haut-parleur de l'enceinte (absorbant en caoutchouc, etc.) et ceci est une technique assez discutée. En effet, pour l'enceinte comme pour le haut-parleur, il est très important de considérer les rapports masse en mouvement/masse des parties fixes. Il faut également tenir compte de l'importance de la surface émissive, proportionnelle à la résistance de l'air. Les accélérations étant extrêmement rapides sur un signal audio, il est primordial que

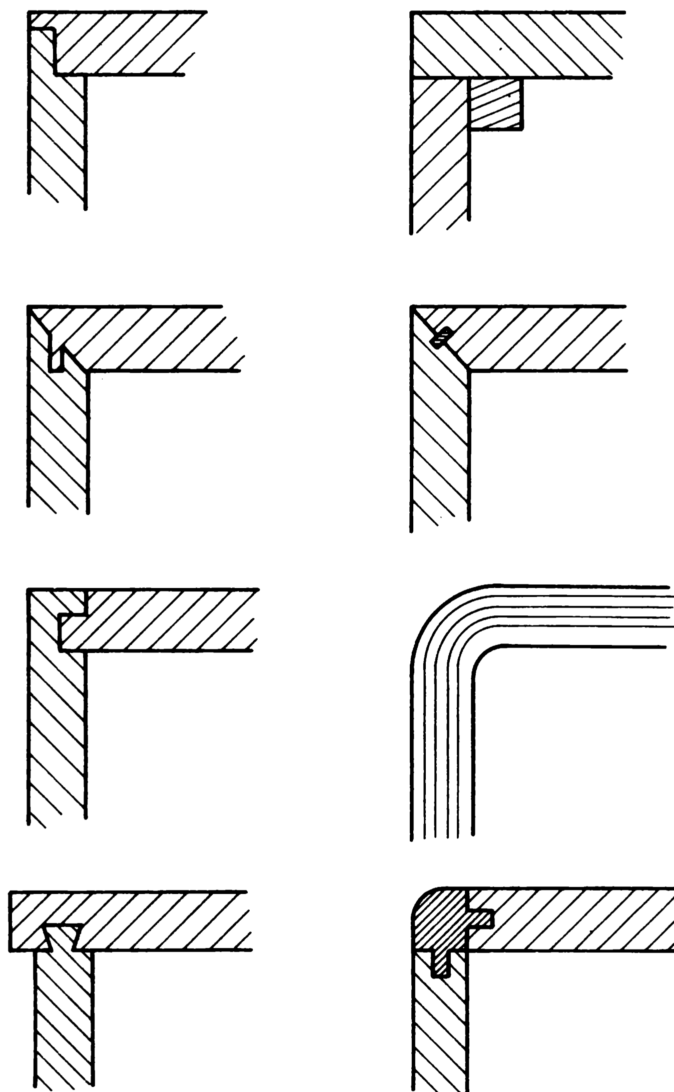


*Fig. 259 : Quelques possibilités de collage des parois entre-elles.*

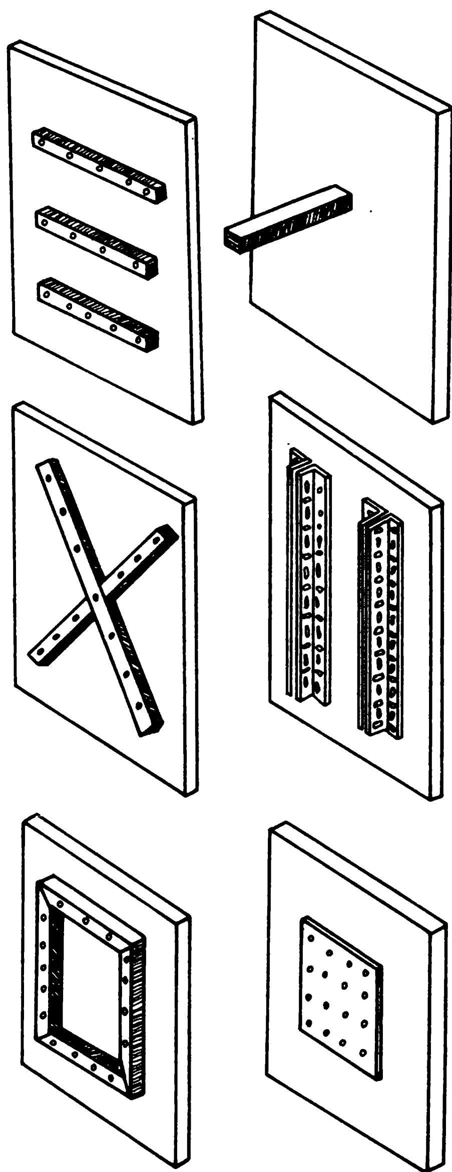


*Fig. 260 : Quelques méthodes connues destinées à réduire les vibrations parasites des parois de l'enceinte acoustique : tasseaux, renforcements métalliques, plaques de plomb, etc.*

ce rapport soit aussi grand que possible, le raisonnable et les possibilités matérielles étant les seules limites. Pour les haut-parleurs de grave, le découplage mécanique peut présenter un intérêt dès l'instant où ces considérations de masse sont respectées et que la fréquence de coupure du découplage mécanique est suffisamment haute pour ne pas gêner le spectre à reproduire. La bague de découplage doit donc être très sérieusement étudiée. Des mesures d'efficacité seront faites en

fonction des fréquences afin de mettre en évidence les éventuelles résonances parasites. La bague de découplage peut poser des petits problèmes pratiques concernant la fixation ou l'étanchéité. Elle ne facilite pas les montages en enceinte close de petit volume (résonances parasites, etc.).

Le bois, matériau le plus utilisé pour réaliser les enceintes acoustiques, existe dans plusieurs variétés résumées sur la figure 258. Quant aux modes d'assemblage des parois entre elles, les différentes méthodes sont décrites sur la figure 259.

La nature de la colle, ainsi que la façon dont celle-ci est mise en œuvre, influent sur la rigidité de l'ensemble. Les tasseaux sont largement utilisés et donnent de très bons résultats dans pratiquement tous les cas. La figure 260 montre quelques exemples. On se sert aussi parfois de plomb, feuilles ou plaques collées et vissées (le collage seul ne tenant pas dans le temps), placé aux endroits vibrant le plus. Dans bien des cas, même sur les enceintes de haute qualité, on peut détecter facilement (par le toucher) ces vibrations parasites. On observe, en effet, une amplitude de vibration des parois très importante par rapport à l'amplitude de déplacement de la membrane. Cet effet est renforcé par l'importance des surfaces des parois devenues ainsi émissives en regard de la surface de la membrane.

## Troisième partie
## Les filtres.

La littérature spécialisée se rapportant aux filtres passifs étant abondante, il ne serait question, faute de place, de prétendre être en mesure de traiter à fond ce sujet. Les lecteurs intéressés pourront éventuellement se reporter aux ouvrages et articles publiés.

Un rappel des principaux filtres passifs, destinés à aiguiller vers chaque haut-parleur la bande des fréquences qu'il doit reproduire, est indiqué sur la figure 261.

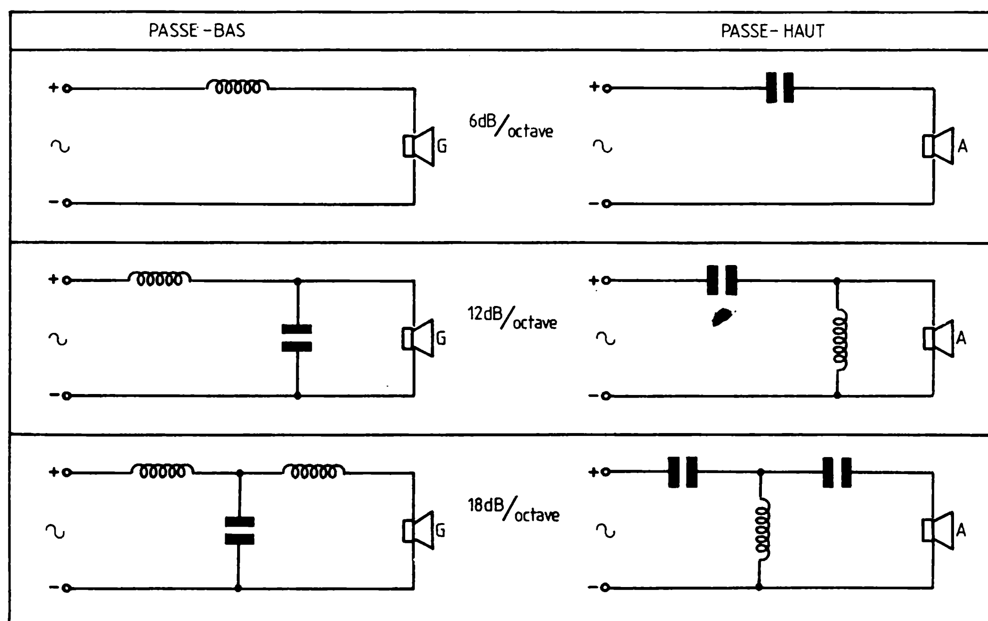
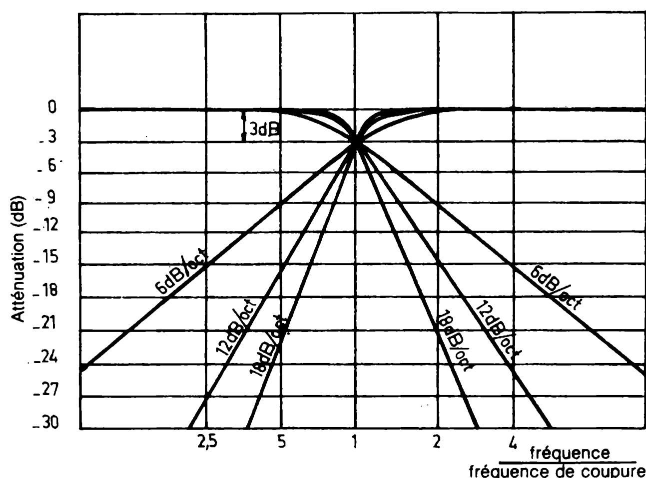



*Fig. 261 : Principaux filtres passifs passe-bas et passe-haut.*




*Pentes d'atténuation caractéristiques des filtres passifs de la figure précédente.*

On pourra également se reporter à la partie filtres séparateurs de l'ouvrage de G.A. Briggs : « Reproduction sonore à haute-fidélité » (Editions Radio, 1958, cet ouvrage n'a pas été réédité depuis cette date).

Un filtre passif est en général composé d'une partie « passe-bas », ne laissant passer que les fréquences basses inférieures à la fréquence de coupure et d'une partie passe-haut ne laissant passer que les fréquences supérieures à la fréquence de coupure. L'atténuation obtenue au-delà ou en-deçà de la fréquence de coupure sera exprimée en décibels par octave. Une atténuation de 6 dB par octave, dite en quart de section, est obtenue par l'effet selfique ou capacitif d'une self ou d'un condensateur. Dans ce cas, la pente d'atténuation introduit à partir de la fréquence de coupure une chute de la puissance égale au 1/4 de la puissance initiale, ceci pour chaque tranche d'octave. Ainsi, un tweeter coupé à 5 kHz, recevant 2 W à cette fréquence ne recevra plus que 0,5 W à 2,5 kHz et seulement 125 mW à 1,25 kHz. Les tweeters ne pouvant admettre qu'une très faible puissance aux fréquences basses se trouvent ainsi protégés. Leur équipage mobile est en effet très léger et ils sont étudiés pour fonctionner au-dessus de leur fréquence de résonance, généralement comprise entre 1 et 5 kHz. En-deçà de celle-ci, la saturation est rapidement atteinte, ce qui se traduit par une augmentation soudaine de la distorsion par harmoniques. Un filtre de ce genre introduit d'autre part un déphasage de 90° à la fréquence de coupure. C'est pourquoi certains constructeurs corrigent celui-ci en reculant le tweeter par rapport au haut-parleur grave d'une distance égale au 1/4 de la longueur d'onde (à la fréquence de coupure), soit 17 mm à 5 kHz et 34 mm à 2,5 kHz. Bien que simple, cette correction n'est pas toujours facile à appliquer : la fixation des châssis des haut-parleurs sur une face plane ne permet pas (sauf si les haut-parleurs et le filtre ont été étudiés en conséquence) d'obtenir les positionnements respectifs corrects des bobines mobiles de ces haut-parleurs, celles-ci servant d'habitude de « plan acoustique ». La réalité est toute autre, l'optimisation de la caractéristique phase/fréquence tenant compte d'autres paramètres : charges réelles non résistives, caractéristiques de directivité, membranes ne se déplaçant pas en piston à toutes les fréquences. Il reste à savoir si ces considérations de phase sont aussi importantes que certains constructeurs d'enceintes voudraient le faire croire. En effet, une écoute « normale » en appartement n'est jamais faite dans des conditions identiques à celles des mesures (à 1 m, dans l'axe, à un positionnement latéral et vertical précis, pour donner un exemple), ceci d'autant plus que le milieu

acoustique semi-réverbérant introduit de nombreuses réflexions primaires et secondaires au point que l'on ne perçoit guère plus de 20 % d'ondes directes.

Ce souci parfaitement justifié au niveau des mesures de la linéarité de la réponse en phase en fonction de la fréquence est à l'origine de toute une génération d'enceintes présentant une face avant de profil particulier. Le filtre en quart de section, à pente d'atténuation 6 dB par octave est celui qui introduit le plus faible déphasage global aux alentours de sa fréquence de coupure. De par sa simplicité, c'est aussi celui qui produit les meilleurs résultats subjectifs. Son application reste néanmoins limitée par le fait que la plupart des haut-parleurs graves présentent des résonances hautes indésirables (situées en général entre 1 et 5 kHz), les tweeters filtrés dans le grave selon une pente d'atténuation trop douce ayant tendance à se saturer prématurément ou à faire ressortir subjectivement leur fréquence de résonance principale.

C'est pourquoi on préfère adopter plus généralement le filtre en demi-section à pente d'atténuation 12 décibels par octave, pour lequel le déphasage à la fréquence de coupure est de 180°. Dans le cas d'un filtre deux voies à pente d'atténuation 12 dB/octave, les haut-parleurs doivent être alignés acoustiquement et reliés en opposition de phase, de même que dans une configuration 18 dB/octave. Ils se relient en phase pour des pentes d'atténuation de 6 à 24 dB/octave. Comme énoncé plus haut, le montage sur une face plane de haut-parleurs de grave, médium et d'aigu produit un non-alignement des plans acoustiques de ceux-ci. Il faudra donc en tenir compte lors d'une optimisation éventuelle de la réponse en phase, le réglage d'alignement à partir d'une impulsion émise par les haut-parleurs et captée par un microphone procurant de bons résultats. Il n'y a toutefois pas lieu de trop s'inquiéter à ce sujet, chaque haut-parleur n'offrant que très rarement une réponse en phase parfaitement linéaire. Il faut y ajouter des rotations de phase dues au filtre et surtout les réflexions acoustiques provenant des murs, du plafond et du sol de la salle d'écoute. Il semble important de noter à ce sujet que l'écoute d'une enceinte (sans même aborder celui de l'écoute stéréophonique) s'effectue avec nos deux oreilles, c'est-à-dire en binaural. On est de ce fait beaucoup plus sensible aux phénomènes de phase dans le sens latéral que dans le sens vertical. Ce phénomène peut être mis facilement en évidence : il suffit d'écouter un enregistrement stéréophonique sur une paire d'enceintes écartées de 2 m et positionnées soit horizontalement, soit verticalement. Dans le second cas, l'effet stéréophonique est pratiquement nul, ce qui nous fait comprendre qu'il est souhaitable sur une enceinte deux, trois ou quatre voies, d'aligner verticalement les haut-parleurs.

Pour en revenir au filtre passif à pente d'atténuation 12 dB/octave, signalons qu'il en existe trois versions. La première, dite à impédance constante est la méthode la plus classique, celle qui apporte généralement les meilleurs résultats subjectifs, ceci malgré une réponse globale produisant, en théorie, un relevé de niveau de 3 dB à la coupure. La seconde et la troisième sont des méthodes plus récentes, dites symétrique et asymétrique, cette dernière comportant en effet des inductances et des capacités de valeurs différentes. Le calcul des valeurs des composants pour ces trois types de filtres 12 dB/oct. ainsi que celui des filtres 6 dB/oct. et 18 dB/oct. est représenté sur la figure 262.

Lors du calcul de la valeur des composants des filtres, il est impératif de connaître la valeur exacte de l'impédance des différents haut-parleurs aux fréquences de coupure choisies, celles-ci ne correspondant pas forcément aux valeurs indiquées par le constructeur. Il ne faut pas oublier de dire que les composants d'un filtre passif classique sont pénalisés en pratique par des tolérances de fabrication plus ou moins importantes. Elles peuvent même atteindre ± 50 % de la valeur nominale pour les selfs comme pour les condensateurs.

Tout amateur souhaitant réaliser un filtre passif se heurte au problème de la mesure de l'impédance des haut-parleurs, de l'inductance des selfs à air ou à noyau ferro-magnétique ainsi que de celle des condensateurs. Pour la mesure des

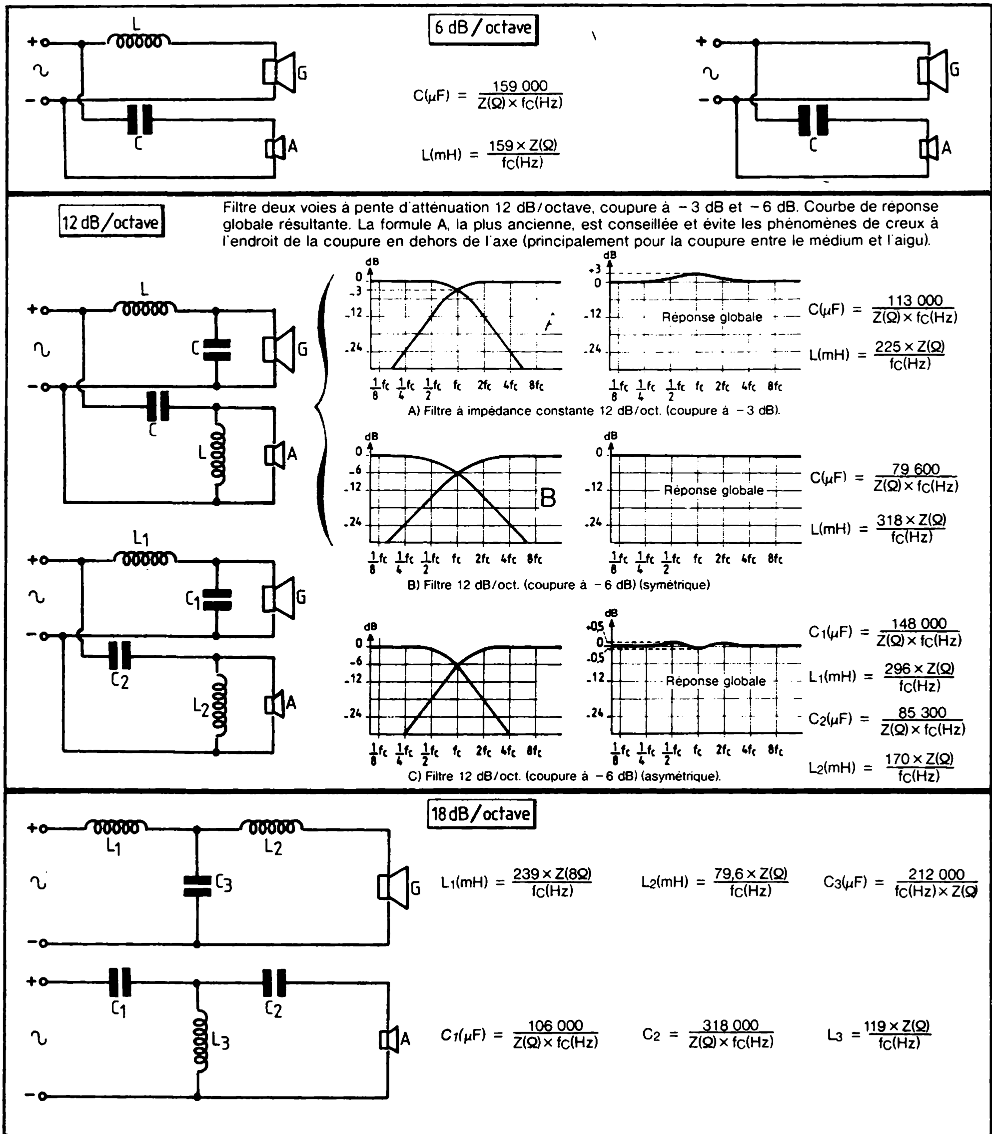



*Fig. 262 : Tableau des principaux filtres passifs avec calcul de leurs éléments.*

condensateurs et, plus récemment, pour celle des selfs, on trouve sur le marché des appareils de mesure de prix abordable proposés soit sous forme montée soit sous forme de « kit ». Cette dernière solution, plus économique en apparence, peut nécessiter l'achat de selfs, de condensateurs ou de résistances « de référence » dont les tolérances de fabrication très serrées conduisent à des prix de revient conséquents.

Différents types de selfs existent dans différentes qualités. Sur les filtres de qualité moyenne on a souvent recours à des selfs à noyau ferro-magnétique :

— bobinage sur tôle « E » ou « EI » avec entrefer ;
— bobinage sur barreau de ferrite ou de fer doux.

Ces différents types de selfs sont représentés sur la figure 263.

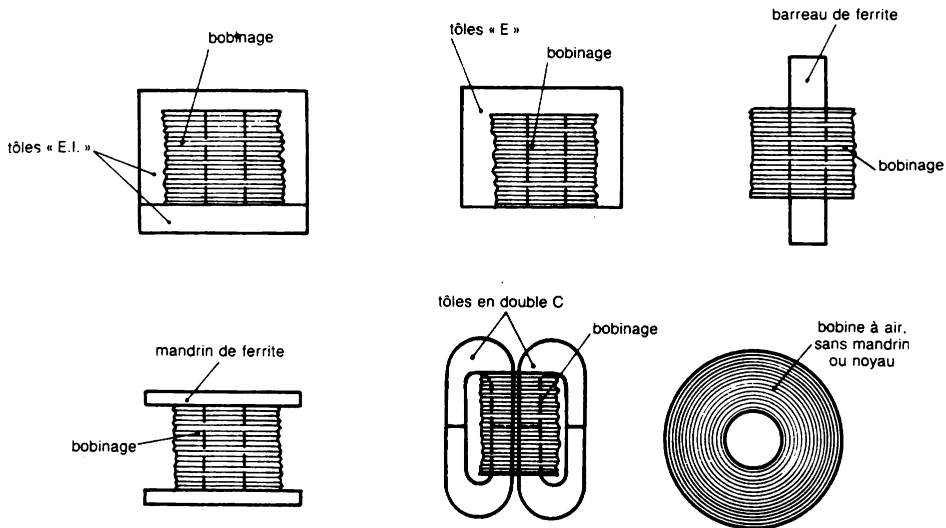



*Fig. 263 : Technologies utilisées pour les selfs de filtres passifs.*

L'avantage que procure le noyau ferro-magnétique est que pour le même nombre de tours, la meilleure concentration du champ magnétique a pour effet d'augmenter sensiblement la valeur de l'inductance. En comparaison, une self « à air », c'est-à-dire sans noyau magnétique, bobinée avec un fil en cuivre émaillé de même diamètre devrait comporter un nombre de spires nettement plus élevé pour atteindre la même valeur d'inductance. Dans les conditions citées ci-dessus, l'avantage offert par la self à noyau ferro-magnétique est une résistance série (en courant continu) plus faible. Pour des fortes valeurs d'inductance (10 mH par exemple), elle peut atteindre 2 ou 3 Ω et il faudra donc en tenir compte lors du calcul de la valeur des éléments du filtre. La self à noyau ferro-magnétique présente aussi plusieurs inconvénients. Si le noyau ferro-magnétique n'est pas de bonne qualité, celui-ci pourra contribuer à une augmentation plus ou moins sensible de la distorsion notamment s'il s'agit d'une self de petites dimensions devant travailler sous de fortes variations de puissance. Une augmentation soudaine du courant peut provoquer des baisses transitoires de la valeur de l'inductance que l'on pourrait assimiler à celle qui se produirait sur une self de filtrage dans laquelle le courant continu passerait subitement de 50 mA à 1 A. Les noyaux ferro-magnétiques constitués de tôles empilées non imprégnées et peu serrées peuvent d'autre part engendrer des vibrations parasites (faciles à déceler lors d'un test sur signaux carrés) générant de la distorsion. Il existe cependant certaines catégories de selfs haut de gamme qui sont équipées d'un noyau magnétique de très haute qualité. Les moins onéreuses comportent un noyau ferro-magnétique de gros diamètre (3 à 5 cm par exemple), les autres utilisant des tôles au silicium à grains orientés en forme de C ou de double C, le tout étant soigneusement imprégné. Les versions les plus sophistiquées utilisent du fil émaillé en cuivre de haute pureté à cristaux longs de type LC/OFC ou OCC (sans oxygène, à cristaux longs ou monocristal de type Ohno) ou bien encore du fil de Litz à la place du fil émaillé traditionnel. Pour les meilleures réalisations, il est fait usage de selfs à air imprégnées sous vide et réalisées à partir de fil émaillé de gros diamètre, compris entre 2 et 3,5 mm. Il en résulte un poids, un volume et un prix conséquents.

Pour les selfs à air, il existe des rapports de dimensions idéales, correspondant pour un diamètre de fil donné et le même nombre de tours, à la valeur d'inductance maximale. La formule de Wheeler est la plus utilisée :

$$L = \frac{0{,}315\ a^2\ n^2}{6a + 9b + 10c}$$

avec L = volume de l'inductance en $\mu$H ; a = b = c, cotes de la self en centimètres ; n, nombre de spires.

La vue en coupe d'une self conçue selon cette formule donne A = B = C, avec A = longueur de la bobine (vue en coupe) ; B = hauteur de la bobine (vue en coupe) ; C = diamètre du trou central, ce qui donne en coupe trois carrés alignés, celui du centre correspondant au trou central.

La formule de Wheeler ne donne cependant qu'une bonne approximation, vu que ce calcul se base sur le diamètre moyen de la self. Des méthodes de calcul plus évoluées existent et tiennent compte de la valeur d'inductance (la méthode de calcul varie selon que cette valeur est faible, moyenne ou élevée), du diamètre et de l'espacement entre les conducteurs et entre les couches ainsi que de la forme du solénoïde (diamètres d'enroulement de la première et de la dernière couche). On peut utiliser la relation suivante :

$$L\,(\text{henry}) = 6{,}28\,(1 + \log\frac{D_p}{l})\,(1 + \log\frac{D_d}{l})$$

avec D = diamètre initial ; $D_p$ = diamètre de la première couche ; $D_d$ = diamètre de la dernière couche ; l = largeur de la bobine.

La plupart des filtres passifs ne comportent que très rarement des selfs à air dont les proportions sont idéales. Pour chaque valeur de self il faudrait en effet utiliser un mandrin de largeur et de diamètre initial spécialement adapté. C'est pourquoi la majorité des constructeurs se contentent de deux ou trois modèles de mandrins, d'autres préfèrent utiliser des supports isolants de section carrée pour transformateurs.

D
d
h
ø = diamètre du fil émaillé en mm

| ø = 1.0 d = 15 h = 20 | | ø = 1.2 d = 25 h = 26 | | ø = 1.4 d = 25 h = 26 | | ø = 2.0 d = 62 h = 68 | | ø = 3.0 d = 62 h = 68 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mH | tours | mH | tours | mH | tours | mH | tours | mH | tours |
| 0.1 | 91 | 0.2 | 100 | 1.5 | 226 | 1 | 150 | 1 | 142 |
| 0.15 | 108 | 0.3 | 118 | 1.8 | 244 | 1.5 | 180 | 1.5 | 168 |
| 0.2 | 122 | 0.4 | 134 | 2.0 | 255 | 2 | 205 | 2 | 190 |
| 0.25 | 134 | 0.5 | 147 | 2.2 | 265 | 2.5 | 225 | 2.5 | 210 |
| 0.3 | 145 | 0.6 | 160 | 2.5 | 280 | 3 | 242 | 3 | 227 |
| 0.35 | 155 | 0.7 | 171 | 2.8 | 295 | 3.5 | 260 | 3.5 | 242 |
| 0.4 | 165 | 0.8 | 182 | 3.0 | 304 | 4 | 275 | 4 | 255 |
| 0.45 | 173 | 0.9 | 191 | 3.2 | 312 | 4.5 | 290 | 4.5 | 270 |
| 0.5 | 180 | 1.0 | 200 | 3.5 | 324 | 5 | 305 | 5 | 282 |
| 0.6 | 195 | 1.2 | 216 | 3.8 | 335 | 6 | 330 | 6 | 305 |
| 0.7 | 210 | 1.4 | 232 | 4.0 | 342 | 7 | 350 | 7 | 325 |
| 0.8 | 220 | 1.6 | 245 | 4.5 | 360 | 8 | 372 | 8 | 342 |
| 0.9 | 232 | 1.8 | 257 | 5.0 | 378 | 9 | 392 | 9 | 360 |
| 1.0 | 244 | 2.0 | 268 | 5.5 | 392 | 10 | 410 | 10 | 380 |

*Fig. 264 : Nombre de spires nécessaires pour réaliser des selfs à air de valeur comprise entre 0,1 mH et 10 mH à partir de fil en cuivre émaillé de diamètre 1 mm, 1,2 mm, 1,4 mm, 2 mm et 3 mm. Il est impératif de respecter les cotes du mandrin.*

Des valeurs d'inductance comprises entre 0,1 mH et 10 mH permettent de réaliser la majorité des filtres passifs. La résistance en continu de ces inductances doit être aussi faible que possible, du moins sur les filtres de qualité. Elle se situe entre environ 0,1 Ω et 1 Ω en moyenne. Le tableau de la figure 264 permettra de réaliser sans l'aide d'un self-mètre, sans calculs et avec une bonne précision des selfs de valeur comprise entre 0,1 mH et 10 mH, à partir de fil émaillé de diamètre compris entre 1 mm et 3 mm. Pour des fortes sections de fil, la tension mécanique doit être élevée, cette condition ne pouvant pas toujours être à la portée de l'amateur. Les selfs doivent être ficelées, imprégnées (sous vide, à chaud ou à froid, avec des colles ou des résines époxy) de façon à éviter les risques de vibrations parasites lors de fortes modulations. Le mode de fixation des sefls à air sur le socle du filtre passif mérite d'être complété de plusieurs petites précisions. Le socle doit être de préférence en bois. Le circuit imprimé faisant office de socle est pratique mais présente les inconvénients d'être fragile et de posséder des pistes dont la résistance parasite série n'est pas toujours négligeable. Sur un signal musical, le niveau moyen décroissant rapidement avec la fréquence, les effets de diaphonie d'une voie sur l'autre peuvent être importants, au point de devenir audibles et mesurables. Ces effets sont décrits sur la figure 264(a). Ils peuvent être éliminés en ayant recours à

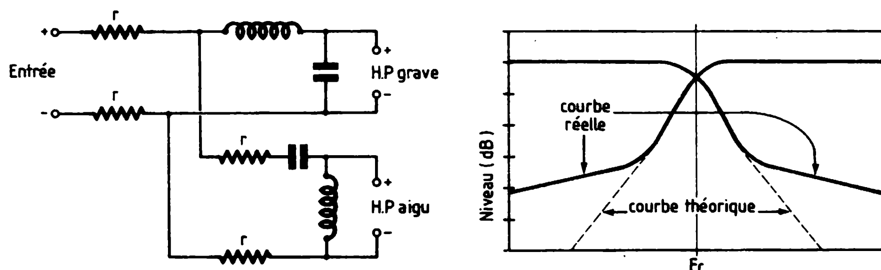



*Fig. 264(a) : Effet de la résistance parasite « r » introduite parfois par les circuits imprimés sur les interférences entre les voies du filtre.*

des méthodes de câblage assurant la connexion directe des composants passifs à l'entrée et aux haut-parleurs sans que ceux-ci transitent à travers plusieurs câbles ou plusieurs pistes de circuit imprimé, les lignes de masse individuelles devant partir des entrées. Une autre méthode complète la première mais sépare totalement les entrées et les masses grave et aiguë ce, jusqu'à la sortie de l'amplificateur, nécessitant ainsi deux paires de câbles par enceinte. Cette méthode dite « bi-câblage » apporte de très bons résultats sur des enceintes de qualité. Ils s'expliquent par le fait que, sur un signal audio, le plus fort pourcentage de l'énergie sonore se situe dans la bande 50 Hz ∿ 500 Hz, la très faible amplitude des signaux de fréquence supérieure à 5 kHz rendant ceux-ci très sensibles aux interférences de la voie grave. Ces deux méthodes de câblage sont décrites sur la figure 264(b).

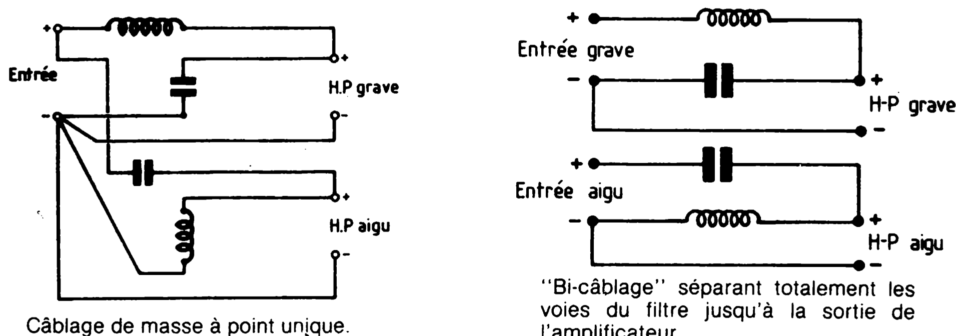
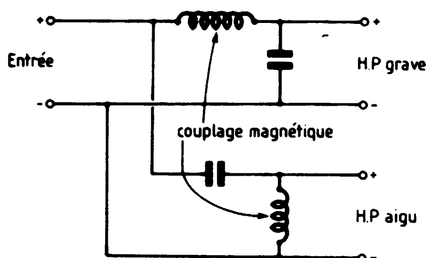
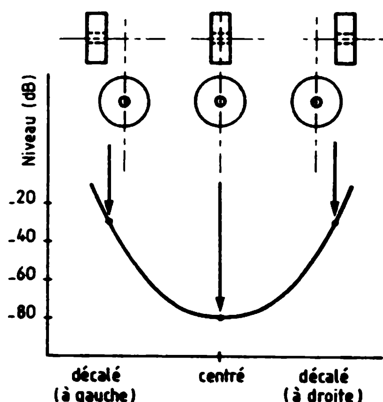



*Fig. 264(b) : Câblages à point de masse unique et "bi-câblage", ce dernier nécessitant deux paires de câbles sur chaque enceinte 2 voies.*

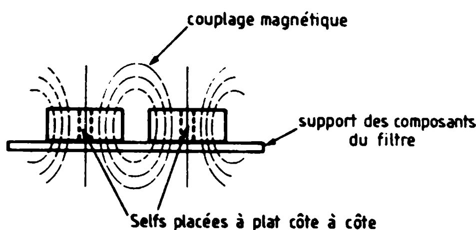
Les selfs à air posent de petits problèmes quant à leur mode de fixation. Le système le plus simple est celui des équerres en matériau amagnétique. L'utilisation de flasques en métal ferreux ou de vis centrales en fer peut modifier sensiblement les valeurs de la self à air. Une autre précaution à prendre lors de la mise en place de plusieurs selfs à air sur un socle est de placer celles-ci de façon à éviter les couplages magnétiques. En disposant les selfs à plat côte à côte, le couplage magnétique entre selfs peut produire des interférences gênantes faussant les caractéristiques du filtre et dégradant la qualité sonore. Ce phénomène de couplage magnétique entre selfs, les effets de celui-ci sur les caractéristiques du filtre ainsi que la disposition optimale des selfs sont représentés sur la figure 264(c).

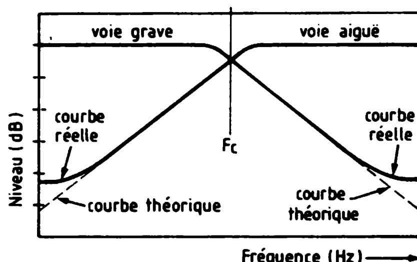
Disposition apportant le plus faible couplage magnétique entre deux selfs.




Effet du couplage magnétique de deux selfs selon leur positionnement.




Effet du couplage magnétique de 2 selfs sur la courbe de réponse.

*Fig. 264(c) : Description du phénomène de couplage magnétique entre selfs.*

Revenons à un filtre passif à pente d'atténuation 12 dB/octave calculé selon la formule A de la figure 262. Cette formule, la plus ancienne, est conseillée car elle évite les phénomènes de creux en dehors de l'axe dans la zone de coupure, ceci principalement dans le médium-aigu. Le calcul des éléments de ce filtre bien que simple, peut être facilité par l'utilisation d'abaques. On trouvera sur la figure 265 un abaque conçu pour ce type de filtre. Il suffit de tracer une droite entre un point et la fréquence de coupure choisie pour obtenir directement les valeurs des selfs et des condensateurs en mH et en µH. On obtient ainsi, sans calcul, la valeur des composants avec une précision suffisante, vu qu'ils sont pénalisés en pratique par d'importantes tolérances de fabrication.

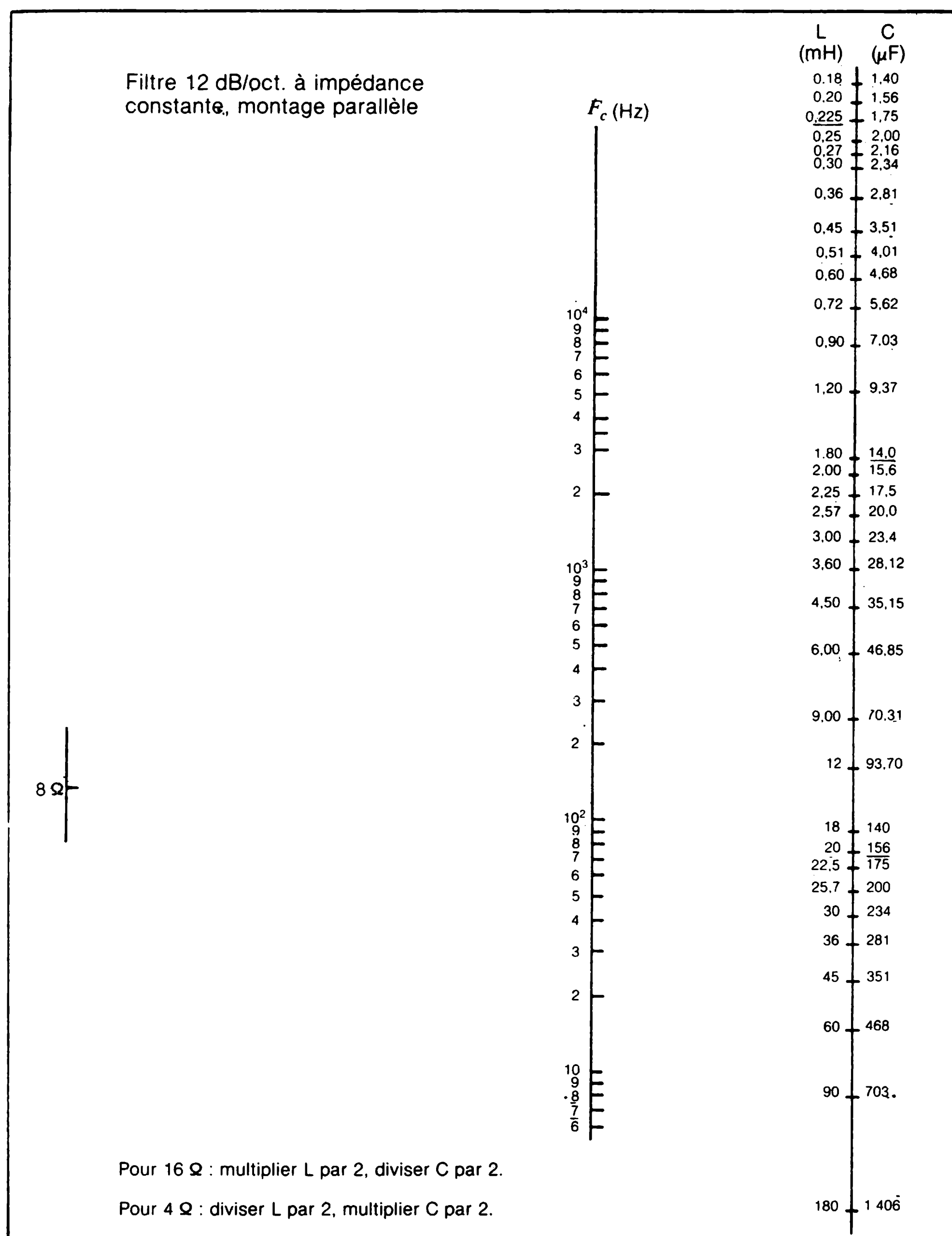



*Fig. 265 : Abaque pour un filtre passif trois voies, pentes d'atténuation 12 dB par octave. Il permet, sans l'aide d'aucun calcul, de connaitre immédiatement la valeur des composants L et C, avec une bonne précision et pour des valeurs d'impédance de charge de 4, 8 ou 16 Ω. (C. Savouret).*

Les condensateurs spéciaux pour filtres passifs existent dans différentes qualités et technologies : papier huilé, papier métallisé, mylar, mylar métallisé, polyester, polypropylène, polycarbonate, mica, mica argenté, électrochimique. Précisons que pour des valeurs de capacités élevées et sur des filtres de qualité « grand public », on a souvent recours à des versions électrochimiques montées en série avec polarités opposées (les côtés + ou − étant montés vers les sorties). Sur les filtres de haute qualité, on utilise des condensateurs beaucoup plus onéreux et encombrants

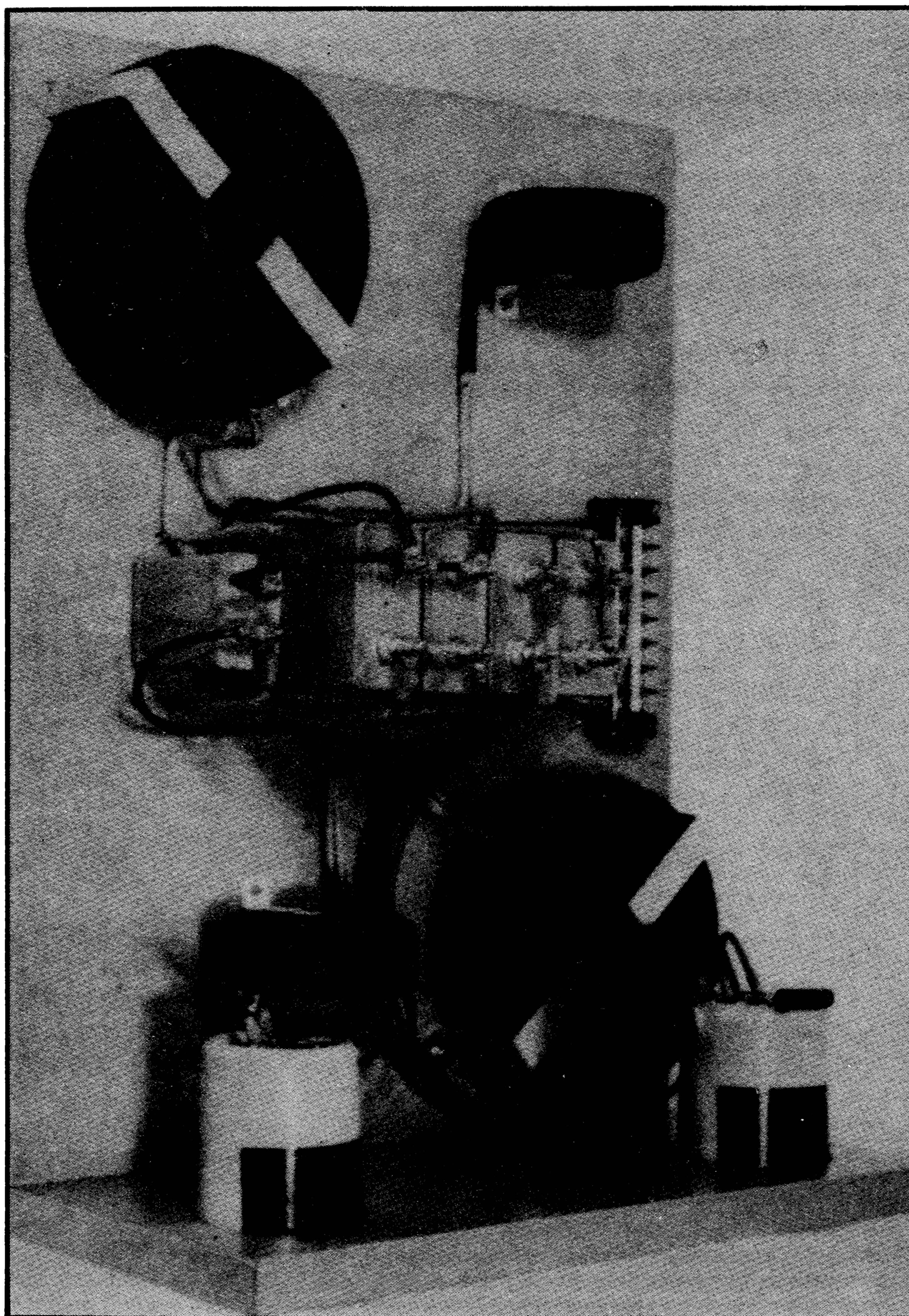


*Fig. 266 : Filtre passif trois voies, atténuation 12 dB/oct, fréquences de coupures 600 et 8 000 Hz. Le diamètre des fils émaillés constituant les selfs est de 3,2 mm. Le poids total voisine 30 kg. Ce filtre de haute qualité est une réalisation japonaise, de marque Onken.*

avec diélectrique de type papier huilé, polycarbonate, polypropylène ou bien encore en associant plusieurs versions en vue d'un résultat subjectif donné. Pour ces applications en haut de gamme, les condensateurs doivent non seulement posséder d'excellentes propriétés diélectriques mais être également très rigides. Les meilleurs d'entre eux possèdent des armatures prises dans une sorte d'étau (système d'équerres), le tout étant noyé dans des matières absorbant les vibrations parasites (genre de cire assez dure).

L'encombrement et le prix de revient de tels filtres sont cependant à la hauteur des résultats subjectifs obtenus. Un bel exemple de très haute qualité est illustré sur la figure 266. Il s'agit d'un filtre trois voies, à pente d'atténuation 12 dB/octave comportant des condensateurs en papier huilé et des selfs réalisées à partir de fil de cuivre émaillé de 3,2 mm de diamètre. La très faible résistance série des selfs n'introduit pas de pertes d'insertion et ne modifie pas la valeur de l'impédance interne de l'amplificateur vue des haut-parleurs. Il convient toutefois de souligner que des filtres de ce genre sont surtout conçus pour des haut-parleurs de haute qualité et que le même souci de perfection doit être apporté aux câbles reliant les haut-parleurs au filtre, à l'ébénisterie, aux câbles de haut-parleurs ainsi qu'aux autres maillons constituant la chaîne.

## Réactions du haut-parleur sur le filtre

Ces réactions sont connues depuis fort longtemps. Diverses études expérimentales montrent les effets d'interaction entre les selfs, les condensateurs et la charge complexe que représente le haut-parleur. Le haut-parleur, charge complexe, variable et instable suivant le signal qui lui est appliqué, est d'autre part un générateur de

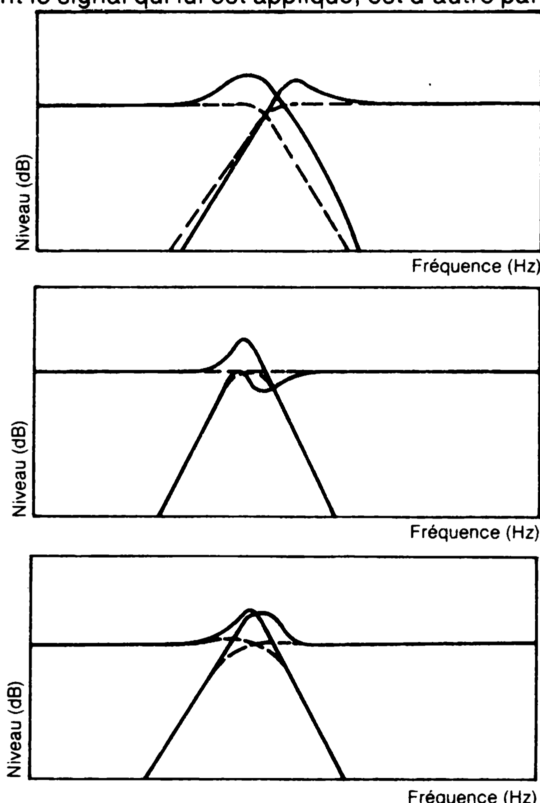



*Fig. 267 : Phénomènes d'interaction filtre / haut-parleurs. Un mauvais calcul des éléments du filtre perturbe la courbe de réponse amplitude / fréquence.*

courant, renvoyant ainsi une partie de l'énergie qui lui est appliquée vers les filtres et vers l'amplificateur. Il en avait déjà été question auparavant. Il s'en suit que, lorsqu'un signal audio est appliqué au haut-parleur, le courant n'est pas toujours en phase avec la tension. De ce fait, certains constructeurs préfèrent donner la puissance nominale de leurs amplificateurs en VA (au lieu de la donner en watts). Il est d'ailleurs possible, à l'aide d'un montage simple (faible résistance montée en série avec la charge) de détecter simultanément les variations de tension par rapport aux variations de courant, et de visualiser l'ensemble sur un oscilloscope.

Le tableau de la figure 267 montre ces divers phénomènes (défauts de linéarité - creux, bosses - pouvant s'accompagner d'une augmentation brusque du taux de distorsion à ces endroits).

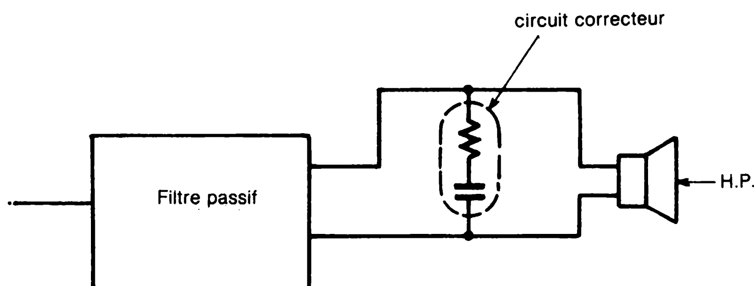



*Fig. 268 : Circuit correcteur, réduisant l'interaction filtre / haut-parleur.*

G.A. Briggs notait d'autre part des résonances parasites situées une octave au-dessus (ou au-dessous, selon qu'il s'agissait d'un passe haut ou d'un passe bas) de la fréquence de coupure. Pour une fréquence de coupure de 600 Hz (filtre passe haut), cette résonance se situe vers 1 200 Hz et son amplitude peut atteindre 3 à 4 dB. A noter que pour les haut-parleurs de rendement élevé, l'énergie renvoyée par le haut-parleur vers le filtre est plus importante que pour les haut-parleurs de moyen ou de bas rendement.

Sur la figure 268 on trouvera une méthode relativement connue, consistant à réduire ce défaut. Il s'agit d'un circuit RC série amortissant ce retour gênant vers le filtre. La valeur de R est en général assez basse (2 à 5 Ω et celle de C se situe en moyenne entre 0,5 et 20 μF, suivant le type de haut-parleur. La méthode de réglage consiste à annuler le dépassement sur signal carré aux alentours de la fréquence de coupure. Ceci peut donner de très bons résultats du côté mesures. Sur le plan subjectif et sur les tweeters en particulier, l'amélioration n'est pas toujours évidente et peut procurer un effet de « son arrondi » ou un certain « manque » sur les sons transitoires. Le circuit RC réduit l'amplitude dynamique transitoire, jouant non pas juste après l'attaque, comme on le souhaiterait, mais aussi pendant celle-ci. Sur ce point, des mesures de temps de montée du signal, d'amplitude maximum du signal sur impulsions brèves seraient souhaitables. Les valeurs du condensateur étant importantes, le temps de charge ne peut pas être considéré comme négligeable. Souvent, on se rend compte qu'il est préférable, lors d'une telle correction tenant compte du résultat subjectif, de réduire la valeur de l'amortissement de ce circuit (C un peu plus faible, R un peu plus élevé). On peut encore avoir recours à des artifices plus simples, tels qu'un décalage judicieux des valeurs de L et C.

Ces divers problèmes peuvent rendre instable l'amplificateur, en raison de la

charge complexe que représente le haut-parleur relié à l'amplificateur par l'intermédiaire de nombreuses selfs et capacités. Les câbles de liaison peuvent aussi intervenir. Certains, de technologie spéciale ( « Star Quad » par exemple), sont destinés à réduire l'inductance serie ; ils sont assez fortement capacitifs (300 à 700 pF/m).

Certains filtres sont d'autre part relativement complexes et ne donnent pas toujours de bons résultats. Du point de vue subjectif il est évident que l'on ressent l'effet d'une plus grande linéarité (but le plus recherché en général). La figure 269 montre un exemple d'un tel filtre, permettant d'obtenir une grande linéarité de la courbe de réponse. Les défauts que peuvent par contre apporter ces systèmes sont

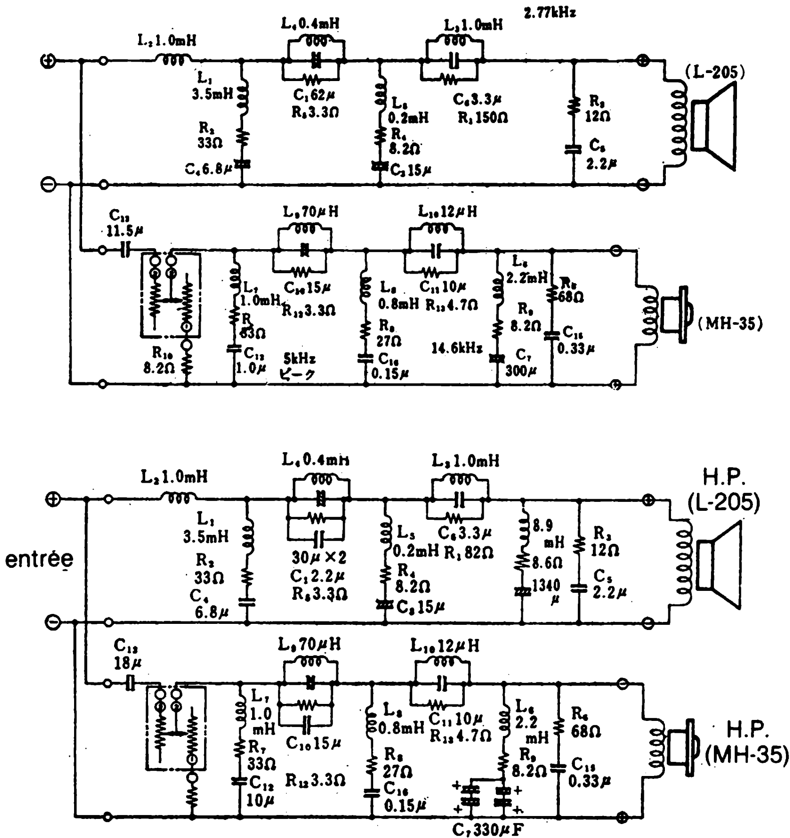



*Fig. 269 : Exemple de filtre passif relativement complexe destiné à obtenir une grande linéarité. La complexité de ce filtre et l'emploi de composants de qualité moyenne peut nuire à la qualité de reproduction. On constate l'insertion de nombreux composants entre l'amplificateur et le haut-parleur. (D'après Hitachi, modèle HS - 50, Avril 1976).*

une perte de qualité subjective due à l'insertion de trop nombreux composants passifs. Ceci sera encore plus ressenti si les composants du filtre ne sont pas de bonne qualité. Ceci est assez fréquent sur les enceintes commercialisées, les filtres n'étant pas visibles de l'extérieur.

La caractéristique d'impédance résultante sur les filtres, peut prendre plusieurs

aspects, depuis la courbe relativement régulière jusqu'aux caractéristiques très mouvementées. Ces dernières peuvent être très gênantes vis-à-vis de l'amplificateur (ne fournissant souvent une énergie constante que sur des charges de valeur assez proches). Certains filtres ont en effet des remontées d'impédance à certaines fréquences non négligeables (40 ou même 50 Ω). Le tableau de la figure 270 illustre ces exemples.

Les haut-parleurs couplés à des filtres passifs complexes peuvent générer des problèmes de différence de rendement, dus cette fois au filtre. Ceci nous reporte à la question relative aux atténuateurs, destinés à rééquilibrer les niveaux acoustiques, un sujet qui vient d'être traité.

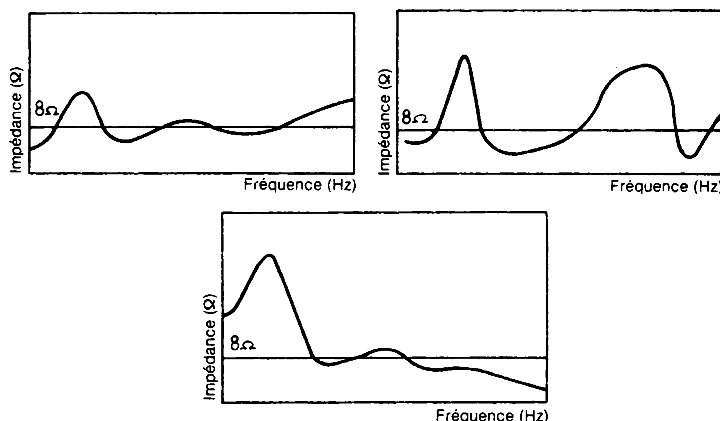



*Fig. 270 : Exemples de courbes d'impédance obtenues par effet d'insertion du filtre entre les haut-parleurs et l'amplificateur. Elles sont parfois très irrégulières.*

A sa fréquence de résonance, la caractéristique d'impédance d'un haut-parleur peut être simulée par une résistance, un condensateur et une self disposés en parallèle, le tout étant placé en série avec une résistance. Si l'on prend pour valeurs respectives 38 µF, 22 Ω, 0,6 mH et 6,8 Ω, on obtient une caractéristique d'impédance simulée d'un haut-parleur de médium-aigu d'impédance moyenne 8 Ω, avec une résistance en continu de 6,8 Ω, un $Q_0$ de 1,27 et une impédance de 30 Ω environ à la résonance de 1,1 kHz. A partir du réseau de simulation d'impédance il est possible de calculer un réseau inverse qui, placé en parallèle sur le premier produira une compensation totale lissant la courbe d'impédance pour la rendre pratiquement droite. De tels types de compensation ont été appliqués sur des enceintes japonaises (Hitachi, Mitsubishi) ainsi que sur les enceintes anglaises Kef. Cette prouesse technologique n'est cependant pas toujours vraiment positive sur le plan de l'amélioration de la qualité subjective qui en résulte. La structure du filtre passif devient beaucoup plus compliquée et il arrive que l'on obtienne une sensation de restitution quelque peu « arrondie », comme suramortie. Il faut d'autre part savoir qu'une bonne majorité d'amplificateurs s'adaptent sans problèmes sur des charges dont l'impédance varie entre 6 Ω et 30 Ω, des variations comprises entre 0,5 Ω et 8 Ω étant par contre mal supportées.

## Filtres passifs correcteurs

Un filtre passif deux ou trois voies n'est pas toujours de structure conventionnelle. On peut, si l'on se trouve en présence de haut-parleurs dont la courbe de réponse est très linéaire, avoir recours au filtrage simple à pente d'atténuation

6 dB/octave. Ceci à condition bien sûr qu'il ne se pose pas de problème d'admissibilité en puissance ou de résonance pour les voies de médium et d'aigu. A l'opposé, il n'est pas rare de rencontrer des enceintes sur lesquelles les filtres passifs n'ont rien d'universel.

Si la théorie est une chose, l'application pratique et la mise au point finale peuvent nécessiter des « retouches » des valeurs des composants du filtre, les calculs ne tenant compte ni des variations d'impédance de chaque haut-parleur en fonction de la fréquence, ni de la linéarité de réponse en fréquence de chaque haut-parleur. Pour des raisons de tenue en puissance, de fréquence de résonance, de non-linéarité de réponse en fréquence, le filtre est parfois conçu pour s'adapter à cette situation : coupure haute à 18 dB/octave, valeurs de L et C décalées volontairement pour créer une légère atténuation avant la coupure, adaptation d'un haut-parleur grave d'impédance plus basse que celle de l'aigu, ceci n'étant que quelques exemples. Pour supprimer une bosse de résonance, on peut ajouter en série dans le filtre un circuit dit bouchon qui est généralement constitué d'un réseau parallèle LRC, R étant de valeur comprise entre environ 4 et 50 Ω. Ce circuit de correction étant passif, on sera contraint d'atténuer d'autant le niveau des autres voies. L'efficacité des haut-parleurs de médium et d'aigu étant presque toujours plus élevée que celle du haut-parleur grave, ce type de correction peut s'appliquer plus facilement aux voies médium et aiguë qu'à la voie grave.



Réponse non corrigée du moteur à chambre de compression médium-aigu.

Caractéristique du filtre correcteur tenant compte de la charge réelle.

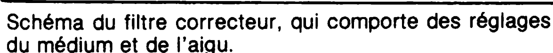
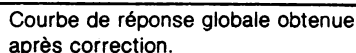


Schéma du filtre correcteur, qui comporte des réglages du médium et de l'aigu.



Courbe de réponse globale obtenue après correction.

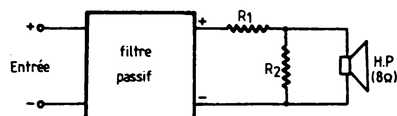
*Fig. 270(a) : Exemple de filtre passif correcteur, corrigeant la linéarité de la voie de médium-aigu, appliquée ici au haut-parleur Tannoy K-3808. Remarquer l'efficacité de la correction qui atteint 10 dB environ ainsi que la possibilité de réglage du niveau médium et aigu. (D'après Tannoy U.K.)*

Lors de l'association d'un moteur à chambre de compression de grande efficacité (110 dB/m/W par exemple) avec celle d'un haut-parleur grave de bonne efficacité (95 dB/m/W par exemple), on s'aperçoit que l'alignement des efficacités des deux voies permet à la voie de médium-aigu de subir une correction amplitude/fréquence pouvant atteindre 15 dB. Le haut-parleur anglais Tannoy « Dual Concentric » K-3808 en est un bon exemple. Sur celui-ci, la courbe de réponse « naturelle » de la voie médium-aiguë est particulièrement pointue : niveau maximal entre 2 et 4 kHz, chute de 10 dB au-delà et en-deçà, mesurées à 800 Hz et à 16 kHz. La figure 270(a) montre la courbe de réponse niveau/fréquence de la chambre de compression médium-aiguë avant correction, la réponse en fréquence du filtre correcteur ainsi que la courbe de réponse résultante. On comprendra ainsi mieux pourquoi la firme Tannoy n'a pas voulu séparer le haut-parleur coaxial K 3808 de son filtre. Insistons cependant sur le fait que ce type de correction n'est possible que sur des haut-parleurs dont l'efficacité est élevée, un relevé prononcé de la réponse aux fréquences élevées ayant pour conséquence d'augmenter dans les mêmes proportions le taux de distorsion harmonique dans la bande de fréquences concernée.

L'association de différents haut-parleurs peut engendrer des problèmes d'écart d'efficacité.

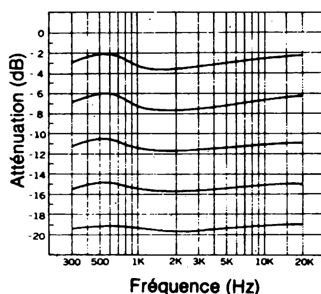
Ceci demande l'insertion d'un circuit d'atténuation appropriée entre la sortie du filtre et le haut-parleur concerné. Ces circuits sont soit des résistances, soit des potentiomètres simples, soit des potentiomètres doubles, lesquels sont appelés atténuateurs à impédance constante. L'atténuation recherchée peut provoquer en effet de légères différences dans l'allure de la courbe de réponse amplitude/fréquence, pour différentes positions de l'atténuation. Cet effet est moins sensible sur l'atténuateur dit « à impédance constante ». C'est un potentiomètre double à trois sorties (axe unique, liaison interne des deux curseurs, deux extrémités des pistes non reliées aux sorties), composé en général de deux pistes de 8 et 30 Ω, ce qui donnera une atténuation sous impédance pratiquement constante. En raison de la dissipation thermique (malheureusement) nécessaire, ces potentiomètres spéciaux ont un wattage souvent élevé, compris entre 25 et 100 W. La plupart de ces atténuateurs, toujours de type bobiné, sont montés sur des supports en stéatite afin de leur conférer une bonne tenue dans le temps. Bien que d'apparence extérieure tout à fait semblable aux potentiomètres bobinés courants, le mode de branchement de ces atténuateurs ne se fait pas de la même façon que ceux-ci. Quelques variantes existent, suivant le constructeur, concernant le positionnement des sorties. Ces sorties sont le plus souvent repérées par des chiffres (1, 2, 3), 1 ou 3 correspondant à la masse commune. Les atténuateurs sont, dans pratiquement tous les cas, insérés dans les voies médium et aiguë, les haut-parleurs de grave ayant une efficacité inférieure. Quelques atténuateurs sont réalisés à partir de résistances de précision ou de sélecteurs à plots. Dans les filtres de qualité, il est parfois inséré des atténuateurs à « autotransformateur », cette solution étant la plus sophistiquée. Par rapport aux solutions précédentes, elle apporte une perte d'insertion (en qualité subjective) pratiquement nulle tout en offrant l'atténuation voulue, grâce à de nombreuses prises intermédiaires sur le bobinage. Au Japon, quelques rares constructeurs et artisans commercialisent ces atténuateurs (Kanno Seisaku, Fukushima, Luxman, etc.). Conçus comme des transformateurs B.F. de hautes performances, ils utilisent des noyaux magnétiques de haute qualité (circuits en double C à haute perméabilité, etc.).

La figure 271 montre ces différents types d'atténuateurs. On trouvera également sur cette figure un petit tableau des valeurs de résistances devant être insérées pour obtenir des atténuations comprises entre − 1 dB et − 18 dB. Ces valeurs, données pour une impédance de 8 Ω doivent être divisées par 2 pour 4 Ω et multipliées par 2 pour 16 Ω. Après plusieurs années d'utilisation ou bien à la suite d'un long séjour en milieu humide, il n'est pas rare de constater des mauvais contacts entre les pistes et les curseurs des atténuateurs à impédance constante. Les versions à

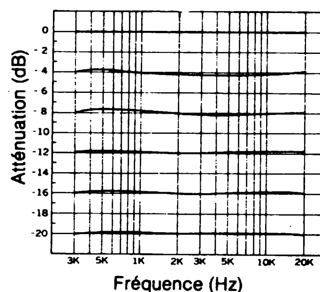



| Atténuation (dB) | R1 | R2 |
|---|---|---|
| – 1 dB | 0,9 Ω | 65,6 Ω |
| – 2 dB | 1,6 Ω | 30,9 Ω |
| – 3 dB | 2,3 Ω | 19,4 Ω |
| – 4 dB | 3 Ω | 13,7 Ω |
| – 5 dB | 3,5 Ω | 10,3 Ω |
| – 6 dB | 4 Ω | 8 Ω |
| – 7 dB | 4,4 Ω | 6 Ω |
| – 8 dB | 4,8 Ω | 5,3 Ω |
| – 9 dB | 5,2 Ω | 4,4 Ω |
| – 10 dB | 5,5 Ω | 3,7 Ω |
| – 11 dB | 5,7 Ω | 3,1 Ω |
| – 12 dB | 6 Ω | 2,7 Ω |
| – 13 dB | 6,2 Ω | 2,3 Ω |
| – 14 dB | 6,4 Ω | 2 Ω |
| – 15 dB | 6,6 Ω | 1,7 Ω |
| – 16 dB | 6,7 Ω | 1,5 Ω |
| – 17 dB | 6,9 Ω | 1,3 Ω |
| – 18 dB | 7 Ω | 1,2 Ω |

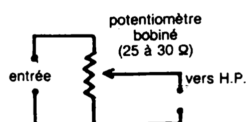
Pour 4 Ω diviser R1 et R2 par 2. Pour 16 Ω, multiplier ces valeurs par 2.

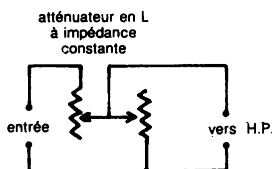



atténuateur en L courant




atténuateur en L (modèle de précision, genre Luxman AS-6)



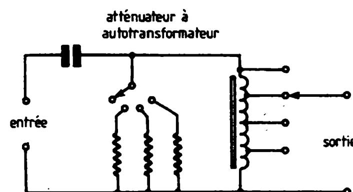




*Fig. 271 : Réseaux atténuateurs à potentiomètre, à impédance constante et à transformateur. Tableau des valeurs de résistances permettant d'obtenir des atténuations comprises entre – 1 et – 18 dB.*

plots sont plus fiables, le maximum de fiabilité étant obtenu en remplaçant une fois le réglage de niveau effectué, l'atténuateur par des résistances de valeur équivalente. Un réglage effectué à l'aide d'un banc de mesure et d'un microphone ne procure pas forcément une linéarité subjective aussi parfaite. On doit en effet tenir compte des caractéristiques de directivité de l'enceinte, du rayonnement acoustique total de celle-ci, de la linéarité de réponse des haut-parleurs et aussi de la coupure grave. Cette dernière va déterminer l'allure que doit prendre le reste de la courbe pour qu'il en résulte une balance tonale correcte. La mesure et le réglage dans un local semi-réverbérant à l'aide d'un signal wobulé (de façon à éviter les phénomènes d'ondes stationnaires) peuvent donner de bons résultats. Entre 1 à 3 kHz, dans la zone la plus sensible de l'oreille, une coloration ou une bosse, visibles ou non à la mesure peuvent conduire à une atténuation un peu plus prononcée par rapport au réglage optimal obtenu d'après la mesure. Sur des enceintes (de petit volume en général) dont la coupure basse est égale ou supérieure à 100 Hz, la plupart des constructeurs d'enceintes compensent subjectivement ce manque d'énergie dans le grave en renforçant plus ou moins le niveau des fréquences comprises généralement entre 100 et 400 Hz, la mesure tendant à produire une courbe de réponse en fréquence descendante vers l'aigu. L'abus de cette correction peut par contre avoir pour résultat de dénaturer les timbres. Le test sur bruit rose est le plus révélateur et aussi le plus sensible. Il permet de déceler des défauts (phase, réponse en fréquence) qui ne sont pas toujours mis en évidence par les mesures sur signal sinusoïdal.

Lorsque l'impédance des enceintes est trop basse, soit moins de 2 Ω à certaines fréquences, il peut en résulter un problème d'adaptation avec l'amplificateur de puissance : instabilité, augmentation du taux de distorsion, mise en œuvre prématurée des protections contre les court-circuits. N'oublions pas le fait que, sur les amplificateurs transistorisés, la puissance n'est pas toujours doublée à toutes les fréquences lorsque l'impédance est divisée par deux. Aux fréquences élevées, l'augmentation de puissance dans ces conditions est souvent plus faible qu'aux fréquences médiums, ce que n'indique pratiquement jamais le constructeur. Des mesures ont prouvé que si l'on passait effectivement de 100 W sur 8 Ω à 400 W sur 1 Ω à 1 kHz, on n'obtenait parfois que 100 à 120 W à 20 kHz. Pour les haut-parleurs à très basse impédance, il est préférable de choisir la solution de l'autotransformateur adaptateur d'impédance 1 Ω : 8 Ω. Ce genre d'adaptateur, courant au Japon, reste cependant difficile à trouver en Europe.

**Facteur d'amortissement**

Ce petit paragraphe a été volontairement placé après le chapitre sur les filtres. Le facteur d'amortissement a été jusqu'ici un sujet très discuté. Les amplificateurs ont, en effet, une résistance interne variant selon le montage. Le facteur d'amortissement est déterminé par la formule :

$$F.A. = R_L / R_o$$

$R_L$ étant l'impédance de charge du haut-parleur et $R_o$ étant la résistance interne de l'amplificateur. Ici, la résistance en continu de la bobine mobile (située en général entre 80 et 95 % de la valeur de l'impédance nominale), ainsi que les résistances série parasites des filtres passifs, des câbles de liaison, faussent de beaucoup la valeur de l'amortissement réel, c'est-à-dire l'amortissement vu de la bobine mobile du haut-parleur. Le facteur d'amortissement, situé en 2 et 1000, suivant le circuit (tubes, transistors, taux de contre réaction faible, moyen ou élevé etc.) retombe, pour les raisons citées ci-dessus, à des valeurs toujours relativement basses. Malgré tout, ces différences, aussi faibles qu'elles soient en réalité, restent nettement

perceptibles. Elles sont très facilement audibles, et le phénomène le plus connu qu'apporte un facteur d'amortissement élevé, est une perte de l'ampleur des sons graves », due justement à une meilleure « tenue » de la membrane par l'amplificateur. Ceci est confondu souvent (lors de comparaisons auditives entre plusieurs amplificateurs par exemple) avec un son « dur », alors qu'il s'agit plus exactement des effets subjectifs combinés d'une meilleure tenue dans le grave et d'une baisse de niveau acoustique dans ce secteur. Ce facteur d'amortissement influe aussi sur les caractéristiques intrinsèques du haut-parleur, en particulier sur le coefficient de surtension Q, un sujet que l'on pourra d'ailleurs trouver dans de si nombreux ouvrages qu'il ne sera pratiquement pas traité dans ce livre. Lorsque, théoriquement du moins, l'impédance interne de l'amplificateur est considérée comme infiniment basse par rapport à l'impédance nomminale du haut-parleur, ceci correspond à un amortissement infini. Lorsque l'on réduit la valeur de ce facteur d'amortissement, cette variation influe sur la courbe de réponse en pression, ainsi que sur le taux de distorsion. La figure 272 montre l'effet de ces variations de facteur d'amortissement. Cette figure permet de constater l'influence de ce dernier sur le coefficient de surtension Q. Ceci donne la formule :

$Q = Q_0 (1 + 1/F.A.)$

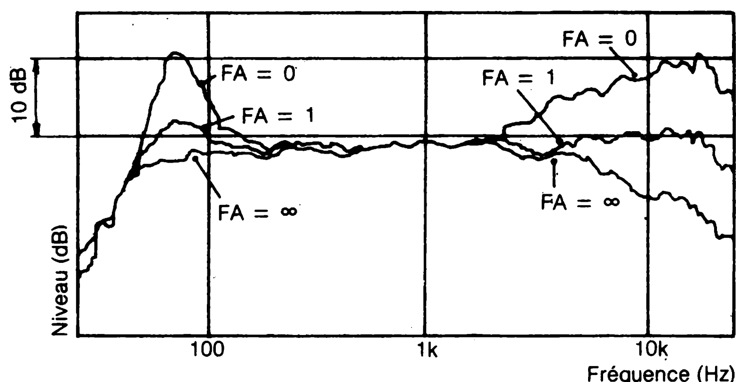



*Fig. 272 : Effet des variations du facteur d'amortissement de l'amplificateur sur la courbe amplitude / fréquence.*

Ainsi, si l'on désire obtenir la condition idéale et bien connue de valeur de coefficient de surtension égal à 0,7 il est nécessaire que le facteur d'amortissement réel se situe vers des valeurs de 2,5 à 3,5.

Concernant le taux de distorsion, celui-ci baisse légèrement aux fréquences basses (près de la résonance fondamentale), lorsque le facteur d'amortissement augmente. Cependant, il faut tenir compte du fait que le niveau acoustique dans cette zone baisse également. Ces questions sont actuellement assez contreversées. Nombreux sont en effet, les haut-parleurs et enceintes acoustiques mécaniquement très amortis et même « suramortis », de même que les amplificateurs au facteur d'amortissement très élevé.

L'amortissement trop élevé ayant un effet de « blocage » de la bobine mobile réduit l'effet de « flottement » de la membrane. Ce contrôle plus rigoureux du déplacement de la bobine mobile cause subjectivement une impression de baisse de niveau dans le grave (visible sur la figure 272), voire même un effet de son « dur » ou « plat », pour reprendre des expressions très usitées à ce sujet.

Il faut penser aussi, à propos du facteur d'amortissement, que celui-ci n'est pas forcément linéaire avec la fréquence.

Pour les raisons citées ci-dessus, l'amplificateur ayant un facteur d'amortissement assez bas procure un son très agréable que certains appellent « profond » ou « ouvert ». Certains amplificateurs, relativement anciens, possédaient parfois un réglage du facteur d'amortissement. D'autres amplificateurs, mettant en œuvre un taux de contre-réaction élevé tentent de rabaisser celui-ci à une valeur plus convenable, ceci en introduisant par exemple, une résistance de petite valeur (moins de 1 Ω en général), en série avec la sortie. Ceci présente par contre d'autres inconvénients. Il existe, bien sûr, des exceptions à ces considérations. Chacun connaît les problèmes de mariage amplificateur/haut-parleur où, mis à part ces questions de facteur d'amortissement, de nombreux autres facteurs influencent le résultat global : stabilité sur charge complexe (signal musical, conditions réelles de fonctionnement et non seulement signaux carrés et charge purement résistive), problèmes d'équilibre subjectif, etc.)

Sur les haut-parleurs à pavillon un facteur d'amortissement élevé peut réduire notablement « l'effet de porte voix », dans plusieurs cas et là aussi, un choix judicieux est à faire en vue d'un « mariage » optimum.

## Autres problèmes

Dans ce livre il n'a pas été abordé de questions ayant un rapport plus ou moins étroit avec le haut-parleur tel que :

-Reproduction stéréophonique (disposition, aire d'écoute, qualités, défauts de diaphonie gauche/droite et vice versa, stabilité de l'image virtuelle, effet de profondeur, etc)

-Local d'écoute : Cette question est beaucoup trop vaste pour tenter d'être traitée, même sommairement, en quelques pages. C'est, en fait, à ce niveau que naissent tous les problèmes relatifs à la reproduction de la musique enregistrée. On peut reprocher au local d'écoute d'ajouter au son reproduit des caractéristiques acoustiques déterminées, défaut que ne possède pas le casque par exemple. Le local d'écoute, aussi bien réalisé qu'il soit, ne peut donc « améliorer le son ». Jamais « transparent » ou « incolore », il possède toujours des caractéristiques bien déterminées relatives aux dimensions, rapport de ses dimensions, formes, traitement acoustique des parois et aux vibrations parasites. L'emplacement des haut-parleurs est lui aussi parfois très critique, car sujet à à recherche de compromis inévitables.

-Problèmes pratiques d'optimisation des systèmes : ceux-ci touchent à de très nombreux domaines dont celui de la psycho-acoustique, et ne pourraient être traités en quelques pages. Un livre entier devrait y être consacré, traitant par exemple des politiques de chaque constructeur pour les divers domaines relatifs aux technologies du haut-parleur. Un tel ouvrage, pour être vraiment pratique, devrait également parler des réalisations commerciales et de leurs utilisations pratiques : problèmes d'adaptation, de mariage entre les divers maillons de la chaîne hi-fi (le tout devant être cette fois reconsidéré). Il serait d'ailleurs beaucoup plus intéressant de réaliser un tel ouvrage sous forme de documents relatant des expériences de chacun, vu que ce côté pratique est toujours une finalité et que cela permet de mieux cerner le côté vraiment concret de ces questions. Pour traiter de tout cela d'une façon efficace, c'est à dire pour améliorer, optimiser son système personnel, il serait nécessaire de parler de ces problèmes sous forme de très nombreux exemples, ce qui étendrait le sujet sur 200 à 300 pages.

- Etudes théoriques plus poussées:

Les divers transducteurs présentés ci-avant sont très nombreux. Leurs variantes aussi. Il existe donc une infinité de possibilités, qui n'en font en fait jamais des systèmes parfaits, mais seulement des compromis.

Il semble important de dire que le présent livre est destiné en grande partie à l'amateur de hi-fi. De ce fait il n'a pas été fait état d'études trop théoriques, concernant plutôt le constructeur. De même, lors d'une étude théorique très poussée d'une enceinte acoustique par exemple, le bon sens de chacun permet de comprendre qu'il existe, bien avant cela, d'autres points encore plus essentiels : la qualité du haut-parleur par exemple, maillon qui, aussi bien étudié qu'il soit, est dans presque tous les cas un transducteur dont le prix de revient peut limiter sévèrement la qualité. Il faut avouer à ce sujet que bien des études faites sur ordinateurs prennent en considération le prix de revient, afin de rechercher un rapport prix de revient /performances aussi intéressant que possible.

Ceci peut rendre tout à fait inutile et presque ridicule un calcul théorique trop poussé. Une enceinte acoustique réussie est toujours un compromis excellent dans lequel le bon sens, l'expérience pratique interviennent en grande partie. En effet, la théorie seule, bien que fondamentale, n'est pas le seul atout de la réussite. Certains acousticiens ont pu déterminer, enfin, pourquoi un Stradivarius « sonnait » bien, à force de mesures tridimensionnelles de vibrations, de mesures holographiques par interféromètres au laser et de calculs très poussés sur ordinateurs. Il n'en reste pas moins difficile de déterminer pourquoi il reste encore impossible d'en réaliser en grande série. Souvent, on confond « empirisme » et « know-how », ce dernier étant la synthèse d'une recherche considérable. Une recherche dans laquelle bien des paramètres dépassent les possibilités de l'ordinateur. La réussite ne doit pas non plus être un hasard heureux, ce qui arrive pourtant souvent. On voit aussi que dans un système réussi, de nombreux facteurs, d'apparence parfois secondaire, ont amélioré assez considérablement le résultat final. Nous n'y reviendrons pas. Il faut penser en effet que la plus grande partie du travail effectué par le haut-parleur concerne non pas l'électronique mais l'acoustique, l'électro-acoustique, la physique, la psycho-acoustique, la mécanique, et, surtout, la reproduction de la musique. Il ne faut jamais perdre de vue que ces systèmes, destinés essentiellement à la reproduction de la musique, doivent satisfaire l'auditeur, du moins la plus grande majorité d'auditeurs. Il existe sur le marché quelques systèmes de référence dont les caractéristiques techniques sont impressionnantes, frôlant le parfait (en termes de linéarité, de distorsion, de réponse en phase, etc.). Il n'est cependant pas toujours évident que de tels systèmes puissent donner entière satisfaction à l'auditeur sur le plan musical. Cette considération nous fait remonter à ce qui a été cité plus haut. Sur ce point le bon sens, l'expérience, le choix judicieux des divers paramètres, des composants de l'enceinte et la façon d'utiliser celle-ci permettent toujours d'aboutir à une bonne solution, pour laquelle le prix de revient peut ne pas intervenir. Parmi les innombrables possibilités, celles du choix du haut-parleur, de l'enceinte acoustique, du mariage entre divers haut-parleurs (grave-médium, aigu) sont primordiales.

**Rendement**

Concernant le rendement de l'enceinte, l'efficacité de celle-ci est un point très important. La chute de rendement a été décisive vis-à-vis du prix de revient des haut-parleurs, du désir de commercialiser des enceintes de petit volume (ce qui est très profitable sur le plan commercial : prix de revient, temps de fabrication, transport, stockage, poids). Tout en essayant reproduire des fréquences très basses dans des petits volumes. l'avènement de haut-parleurs de « haute compliance » et des aimants céramique de petit volume, facteurs qui ont fait chuter assez consi-

dérablement l'efficacité, le rendement du haut-parleur. Autrefois situé entre 95 et 100 dB dans bien des cas, celui-ci a considérablement baissé, passant parfois à des valeurs aussi basses que 82 dB/m/W, une valeur qui n'aurait d'ailleurs jamais été acceptée par le public il y a 15 ans.

Sur ce point, en revenant au moteur WE 555 W par exemple, on voit que la compensation éventuellle du faible rendement par un amplificateur très puissant est assez illusoire. Il existe, bien sûr, quelques cas où le compromis est relativement bon. Mais des moteurs faibles actionnant des masses en mouvement très grandes entravent toujours un bon fonctionnement en régime transitoire. En 1934, Mac Lachlan le savait déjà et le prouvait par des mesures très en avance sur son époque. Les courbes niveau d'entrée/puissance acoustique, qui montrent une saturation rapide du niveau acoustique pour les systèmes de bas rendement, expriment cette impossibilité de compensation totale. Il n'est même pas tenu compte du com-

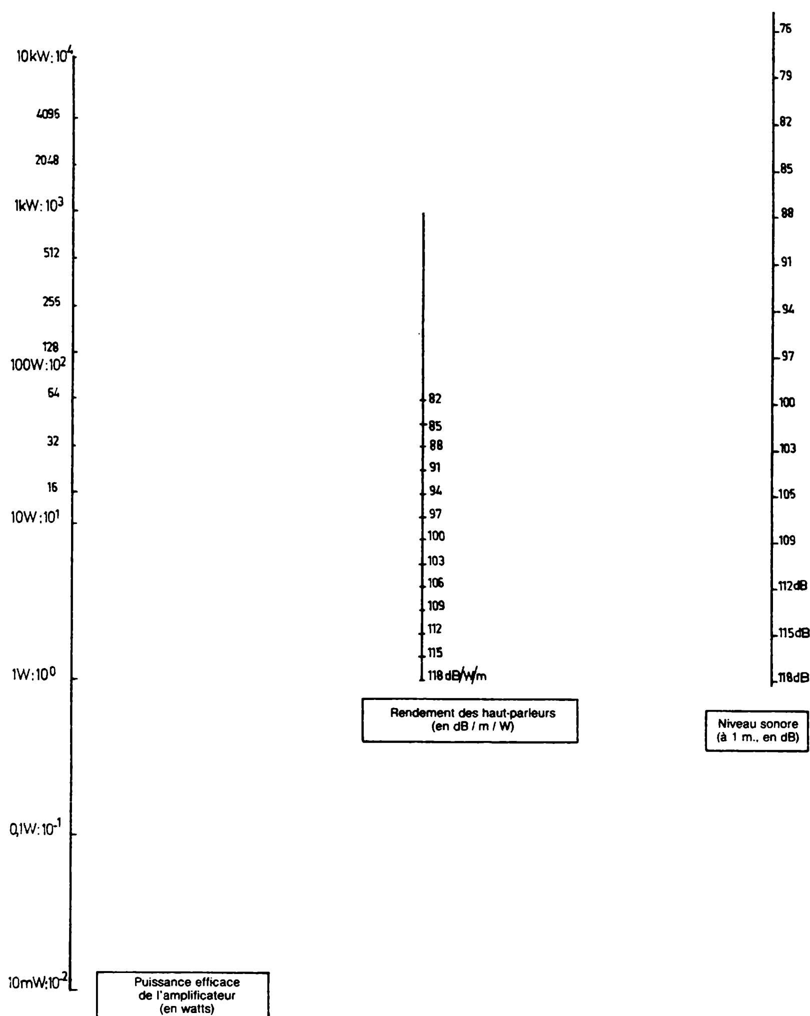



*Fig. 273 : Abaque indiquant les rapports niveau acoustique / efficacité du haut-parleur / puissance de l'amplificateur. Pour obtenir ces rapports il suffit de tracer une droite entre les points désirés. (C. Savouret).*

portement thermique de la bobine mobile devant dissiper une grande puissance, pour l'obtention d'un niveau acoustique donné.

La figure 273 montre, sous forme d'abaque fort pratique, ces rapports niveau acoustique, efficacité, puissance de l'amplificateur. Sans prétendre que 115 à 130 dB soient un niveau acoustique « d'appartement », ceci montre les impossibilités et le danger présenté par les enceintes à bas rendement, pour obtenir un niveau acoustique acceptable. Il est fort souhaitable de travailler sur des systèmes dont le rendement se situe entre 93 et 100 dB, voire même plus. Mis à part ces questions, il faut penser aussi aux problèmes de dynamique, de compression de celle-ci, un défaut qui, allié à d'autres défauts (réponse transitoire par exemple) ne pourra plus donner satisfaction sur le plan subjectif, sur le plan de la qualité de reproduction de la musique.

### Médium

A part ce fait évident que les enceintes sont passées à des volumes de plus en plus réduits, solution pratique mais inintéressante sur d'autres plans (déplacement plus important de la membrane, bobine mobile sortant des parties linéaires du champ magnétique, distorsions diverses), un autre point mérite l'attention : les dimensions des haut-parleurs de médium. Alors qu'autrefois le haut-parleur de grave avait un diamètre compris entre 30 et 38 cm en moyenne, celui-ci est passé de 20 à 25 cm. Quant au haut-parleur de médium, il a soit disparu, soit été considérablement réduit en surface : autrefois de 16 à 20 cm, certains haut-parleurs de médium sont passés à des diamètres aussi faibles que 3 cm. Ceci explique l'insatisfaction de ceux ayant eu une longue expérience en matière de reproduction sonore. La question de M. Iwata « Le progrès peut-il réduire jusqu'à la longueur d'onde ? » est une question que l'on pourrait se poser. Là aussi le bon sens joue énormément et un diamètre de 13 à 16 cm est une valeur universelle qu'il est préférable de respecter.

## A propos des mesures

### Directivité

Il en avait été question dans d'autres chapitres à propos de certaines technologies. Globalement cette caractéristique est très importante, en particulier pour les haut-parleurs de médium et d'aigu. Cette question devrait être traitée normalement en même temps que celle de l'acoustique de la pièce et du positionnement de l'enceinte dans celle-ci. Bien plus que cette caractéristique de directivité, la caractéristique d'énergie acoustique rayonnée est primordiale. Cette énergie acoustique (radiation acoustique totale) correspond à ce qu'émet le haut-parleur dans toutes les directions à la fois, la quantité d'energie acoustique qu'il fournit. Cette caractéristique de radiation totale n'est pas toujours le reflet de la caractéristique de directivité conventionnelle, mesurée sur le plan latéral par exemple (0°, 30°, 60°, 90°). Elle montre que certains haut-parleurs (dômes par exemple) peu directifs ont une caractéristique de radiation acoustique totale chutant très rapidement aux fréquences élevées. Inversement, quelques tweeters à pavillons, plus « directifs » sont plus linéaires sur ce point. Cette caractéristique semble jouer beaucoup sur les critères de dynamique et de définition. On note aussi qu'une éventuelle pré-correction de la courbe de réponse n'arrange pas les choses, tandis que plusieurs tweeters placés dans différentes directions donnent de meilleurs résultats. L'ennui est que pour les aigus, il est souhaitable d'avoir une source à la fois ponctuelle et omnidirectionnelle, ce que plusieurs tweeters ne peuvent faire.

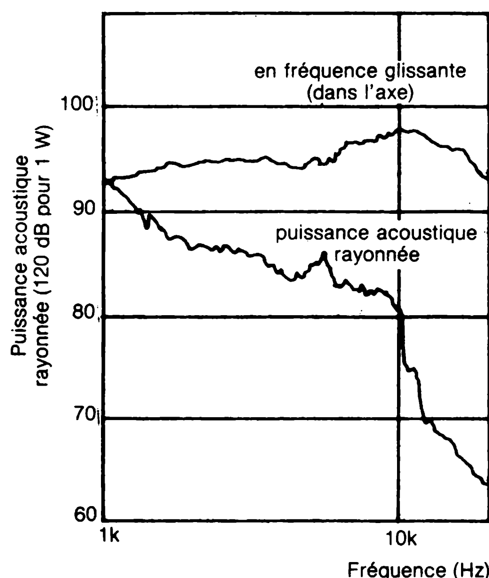



*Fig. 274 : Mesures concernant la radiation acoustique totale, comparée à la courbe de réponse dans l'axe. De telles mesures ont beaucoup intéressés certains constructeurs et revues japonaises (Toshiba, Radio Gijutsu). Elles influent en effet sur la dynamique et sur la réponse transitoire en termes de radiation acoustique totale.*

Sur la figure 274, on trouvera des mesures concernant ces questions de radiation acoustique totale.

A propos de directivité, il existe aussi des systèmes de reproduction à émission acoustique indirecte, tel celui décrit sur la figure 275. Une parenthèse sera également ouverte sur les diffuseurs acoustiques, parfois utilisés pour diffuser les sons dans des directions déterminées (ou non déterminées). Ces artifices sont décrits sur la figure 275 bis.

## Réponse transitoire

Le problème de la réponse transitoire est souvent discuté car très important. Sur ce point l'écoute est une très bonne référence car elle intègre simultanément de

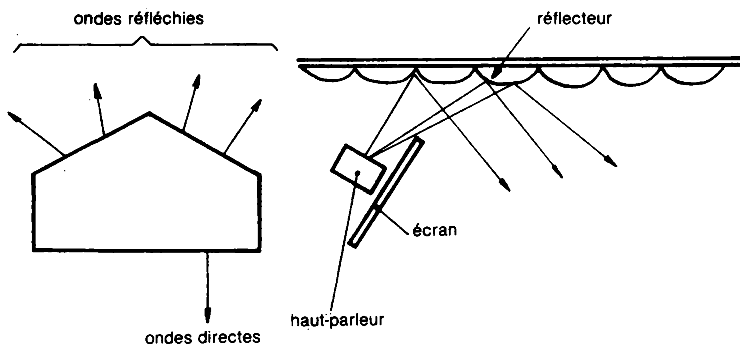



*Fig. 275 : Haut-parleurs à radiation acoustique indirecte. Plusieurs applications ont été réalisées.*

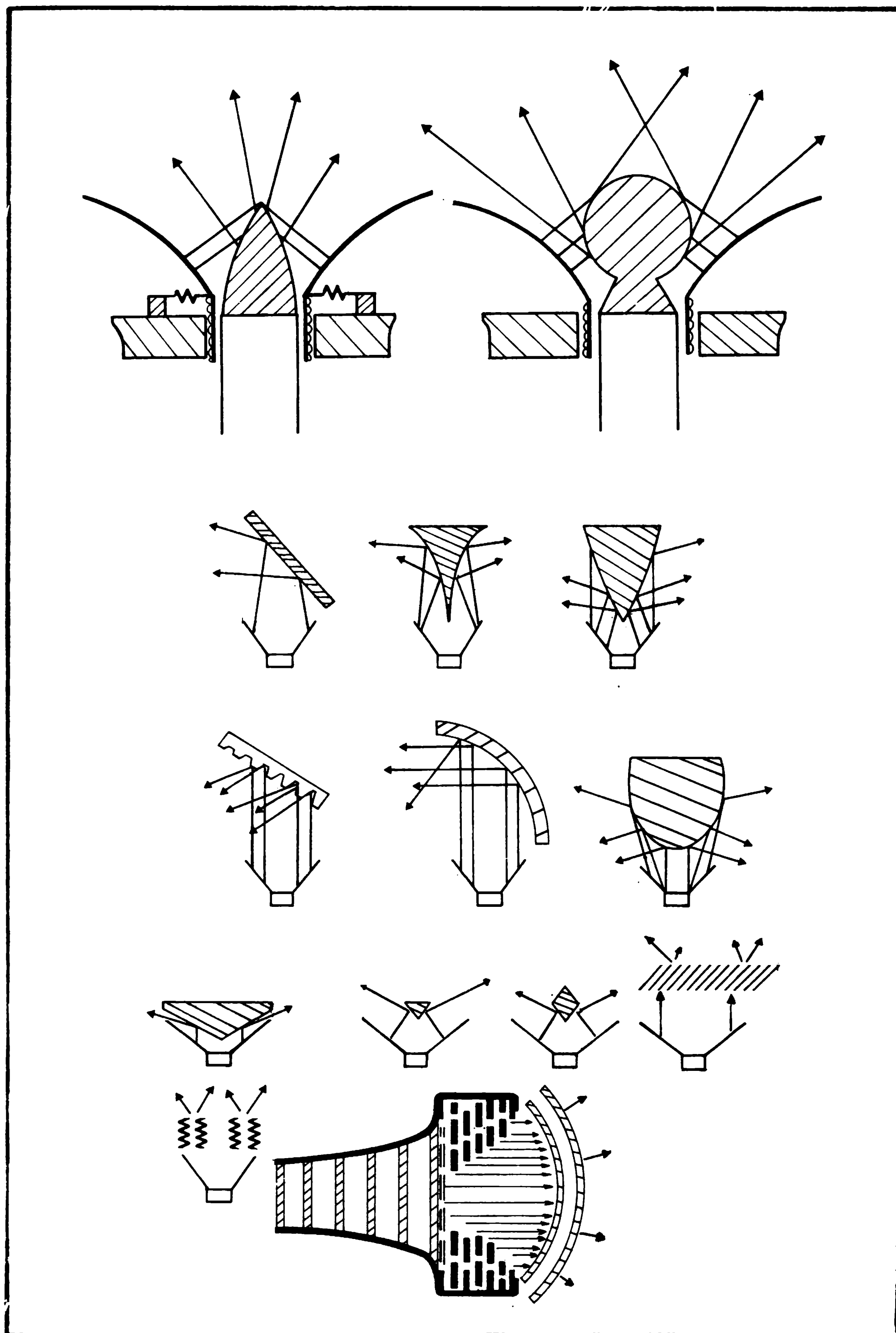


*Fig. 275 bis : Réflecteurs et diffuseurs acoustiques.*

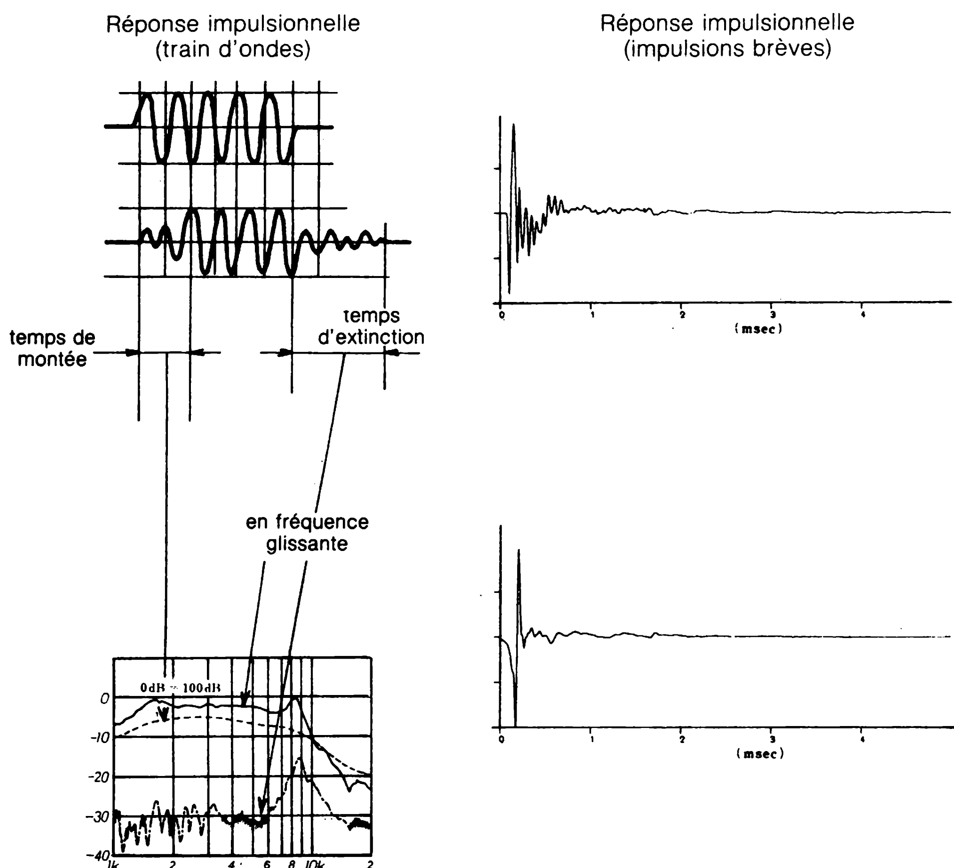



*Fig. 276 : Réponse sur impulsion brève et sur train d'ondes (tone burst), permettant d'établir une intéressante caractéristique de « trainage », dont l'effet subjectif est prononcé (dynamique sonore, impact, transitoires). (D'après Toshiba, Radio Gijutsu, 1971).*

très nombreux paramètres. Du côté mesures, il existe plusieurs méthodes. Celles-ci sont par exemple celle de l'impulsion brève, indiquée la figure 276. Noter que le traînage suivant l'impulsion est de deux types : soit un traînage correspondant à une atténuation plus ou moins rapide de la fréquence injectée, soit encore un signal plus irrégulier, dû souvent à un suramortissement, un « blocage » de la membrane. Ce deuxième cas bien que paraissant supérieur aux mesures, n'est pas toujours l'idéal du point de vue subjectif. En effet, très souvent un amortissement trop fort a tendance à réduire l'amplitude du signal et à augmenter le temps de montée de celui-ci. Ce phénomène se constate également sur les phonolecteurs. Lors d'un trop fort amortissement, des accidents se produisent lors de la montée du signal, venant vraisemblablement d'interactions entre l'amortissement mécanique, la masse en mouvement et la force motrice. Sur ce point, les notions de « transitoires » sont souvent confondues avec celles concernant la dynamique ou l'amortissement mécanique.

Une telle réponse sur impulsion brève peut se décomposer en série de Fourier, permettant ainsi de connaître la forme spectrale de la montée du signal. Ces importants travaux, déjà discutés en 1958 par D.E.L. Shorter (figure 277) ont été repris avec succès par J.M. Berman et L.R. Fincham en 1977 (KEF Electronics). Ces

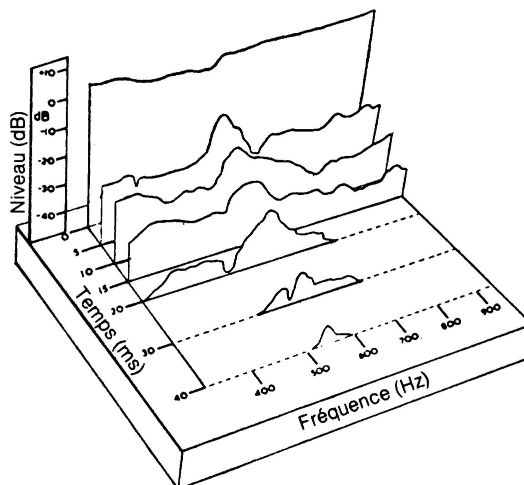



*Fig. 277 : Réponse « retardée », selon une mesure réalisée en 1946 par D.E.L. Shorter. (BBC quarterly).*

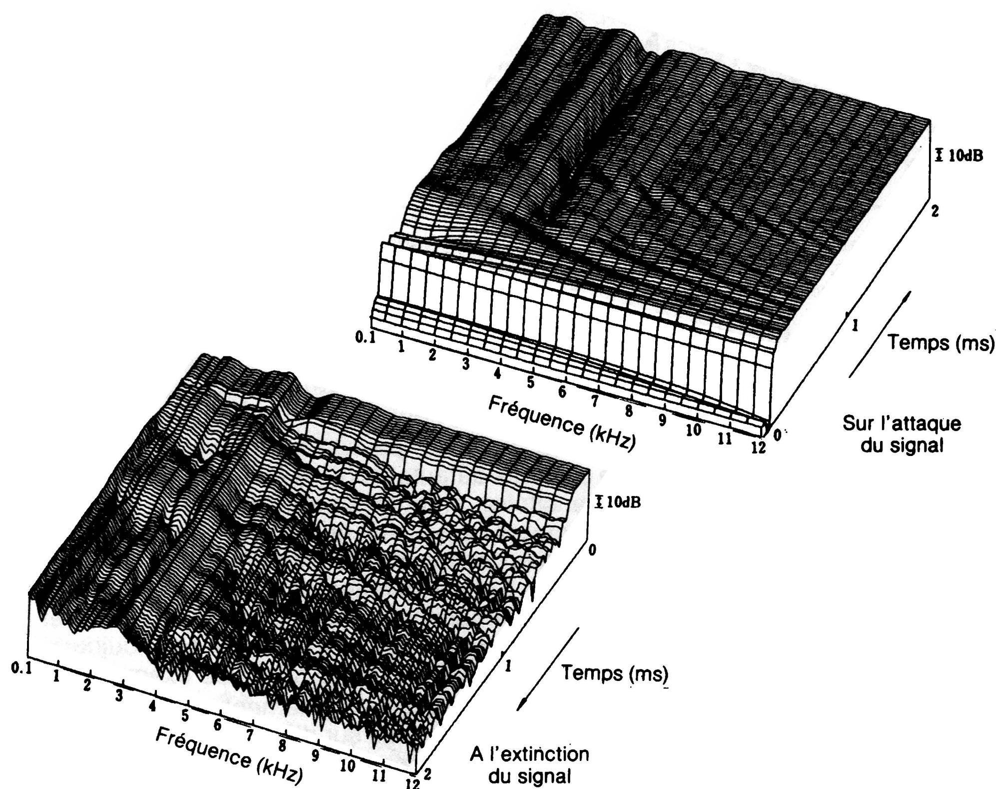



***Fig. 278 : Exemple de courbes de réponses tridimensionnelles, décomposant l'attaque et l'extinction d'un signal appliqué au haut-parleur. Cette décomposition se fait en temps, fréquence et amplitude. Méthode proposée par KEF en 1977 (J.M. Berman, L.R. Fincham) révélant de nombreux défauts, indécelables par d'autres méhodes de mesure. Elle fut par la suite reprise par de nombreux constructeurs (B & W, G.B, Pionner, Japon).***

mesures sont faites à l'aide de calculateurs électroniques qui permettent d'obtenir des graphes tridimensionnels. On peut ainsi apprécier l'évolution du signal sur l'ensemble du spectre, pendant l'attaque et après l'extinction du signal (figure 278). Cette méthode fut reprise par d'autres firmes que KEF, promoteur de ce type de mesure très évoluée (par exemple Pioneer, Hitachi, Toshiba, JVC, Technics ou B et W).

La réponse sur trains d'onde est également intéressante, surtout s'il est possible de réaliser une courbe à partir d'un temps de mesure prédéterminé sur l'attaque et l'extinction du signal. Cette double courbe provient de l'intégration des temps de montée et d'extinction d'un train d'onde. Liée au temps de montée moyen sur l'attaque et l'extinction du signal sur l'ensemble du du spectre sonore, elle est en quelque sorte la « courbe de rendu des transitoires ». Le rendu idéal serait représenté par des courbes parallèles, très écartées. Dans la pratique, si l'on prend l'exemple d'un tweeter, un modèle moyen montrera des courbes se rapprochant aux fréquences élevées. Et pourtant les mesures de bande passante pouvaient être presque parfaites, ne rendant pas compte d'autres défauts (non linéarité de radiation acoustique totale, mauvaise réponse transitoire, amortissement trop élevé, etc.). Il est compréhensible que de tels transducteurs ne peuvent que donner des résultats subjectifs très moyens. La qualité subjective des tweeters est également influencée par le contenu de la distorsion harmonique. Sur ce point, des transducteurs présentant un taux élevé d'harmonique 3 ou d'harmoniques impairs peuvent présenter le défaut de « pointe dans l'aigu » ou de dureté que ne révèleront pas toujours les méthodes de mesures classiques. La figure 279 montre quelques exemples.

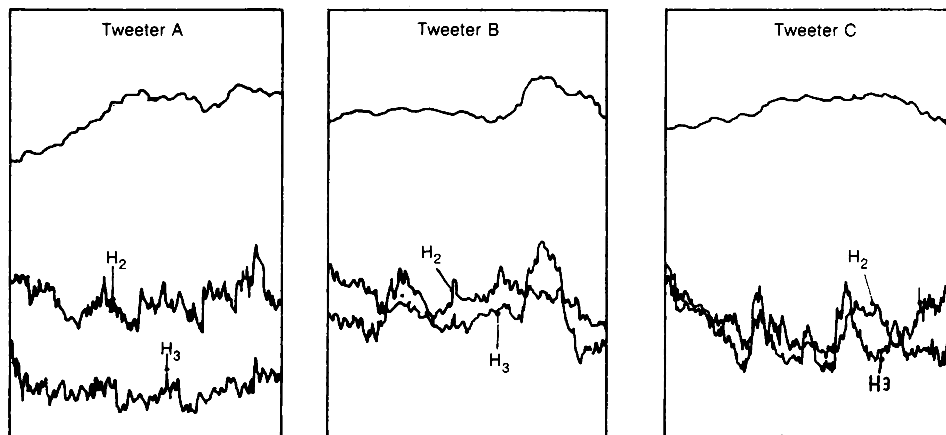



*Fig. 279 : Caractéristique de distorsion par harmoniques de tweeters. Lorsque la bande passante est limitée à 20 kHz ou moins, la mesure de distorsion par harmoniques entre 8 et 20 kHz peut être faussée, les harmoniques se situant bien au delà de 20 kHz.*

La courbe de réponse sur bruit rose (figure 280) est également une méthode intéressante, de même que la comparaison de bruit rose sur différents haut-parleurs ou systèmes. Du point de vue subjectif les différences sont souvent très grandes d'un système à l'autre. Cette méthode révèle facilement des défauts d'un système ainsi testé.

Les accidents constatés sur la courbe d'impédance se retrouvent sur la courbe de réponse en niveau ou encore sur la courbe de distorsion. Ceci est détaillé sommairement sur la figure 281.

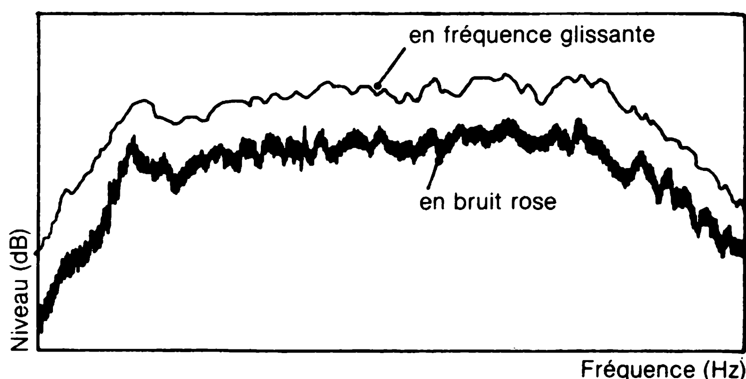



*Fig. 280 : Courbe de réponse sur bruit rose.*

La mesure d'impédance s'effectue facilement, à l'aide d'un générateur B.F., d'une résistance d'assez forte valeur (environ 100 Ω) placée en série avec le haut-parleur et d'un voltmètre audio. Cette méthode est indiquée sur la figure 281 bis.

Nous ne nous étendrons pas trop sur les mesures, certaines restant difficiles à interprêter. En effet l'écoute d'un micro n'est pas celle de nos deux oreilles. Quant à une méthode de mesure éventuelle, à l'aide d'une tête artificielle, celle-ci n'est pas encore trouvée, pour une question de difficultés dans le matriçage des deux canaux.

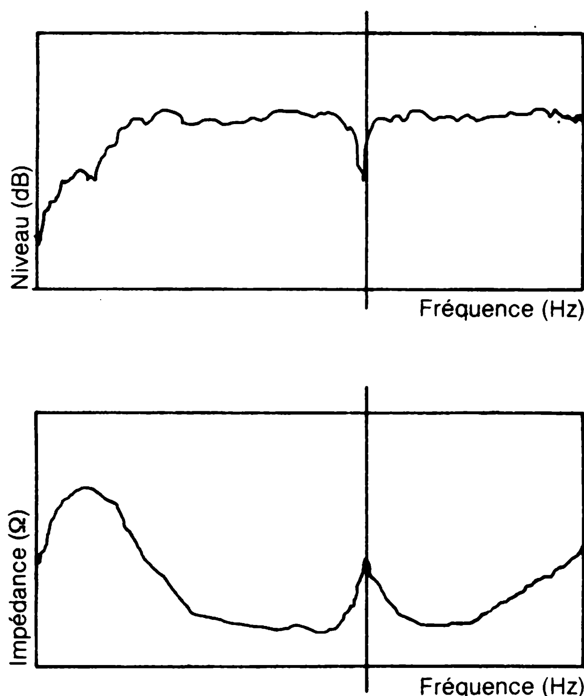



*Fig. 281 : Exemple d'irrégularités sur la courbe d'impédance, retrouvé sur la courbe de réponse amplitude / fréquence.*

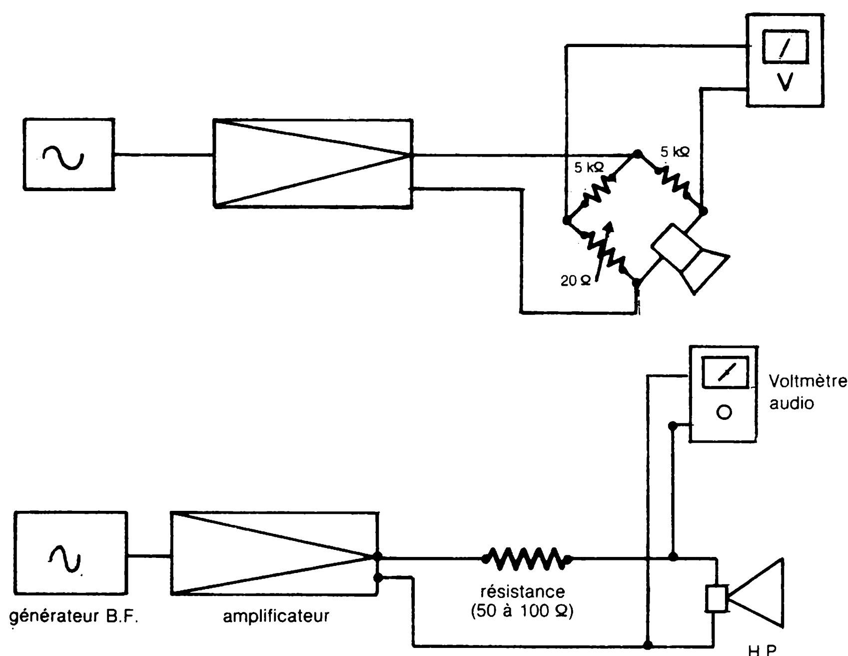



*Fig. 281 bis : Méthode de mesure conventionnelle de l'impédance d'un haut-parleur.*

## Possibilités d'avenir

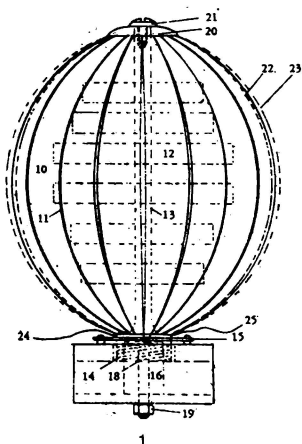
Vouloir émettre simultanément, à l'aide d'une membrane, aussi rigide et aussi légère qu'elle soit, actionnée par une force motrice aussi grande qu'elle soit, impose de sévères limitations dans la pratique (surtout si l'on inclue le prix de revient). Produire un niveau acoustique aussi élevé que possible, à partir d'une source ponctuelle et isotropique, est une exigence difficile à obtenir dans la pratique. La solution de plusieurs haut-parleurs combinés, où chacun reproduit une partie donnée du spectre sonore (grave, médium, aigu) n'est qu'un compromis dont on connaît les limites.

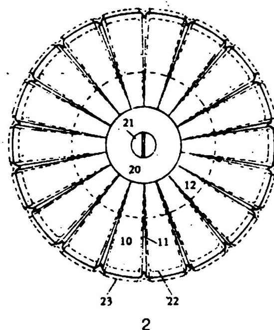
La sphère pulsante (fig. 282), inventée depuis longtemps, oubliée, reprise, pose aussi des difficultés du point de vue électromécanique.

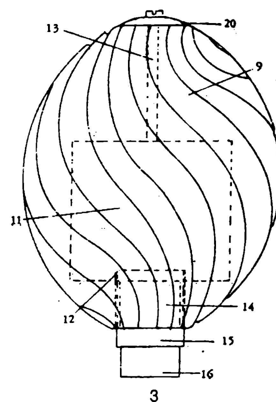
Que sera le haut-parleur du futur ?

Un système entièrement digital, paraissant utopique mais étudié par certains Japonais, utilisant plusieurs sons purs contrôlés chacun directement ou à l'aide de valves très rapides, recompose ainsi le son, sans buter sur ces problèmes de masse en mouvement (figure 283). Tous les passionnés de haut-parleurs attendent cette révolution.

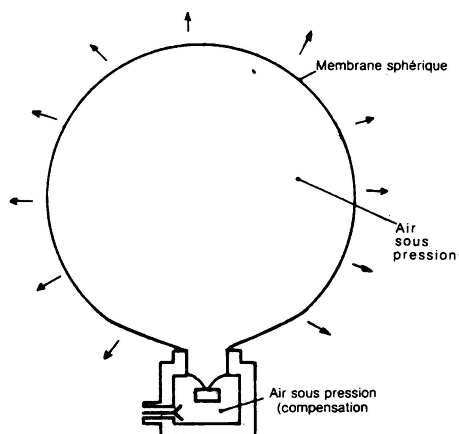
Mais le fait que le principe de Rice-Kellogg soit resté sur le marché mondial plus de 50 ans prouve bien la véracité de l'affirmation de G.A. Briggs et R.E. Cooke : « Lorsque l'on se déplace en Rolls-Royce, on oublie totalement à quel point peut être imparfait le moteur à explosion ». On retrouve, une fois de plus, les questions d'investissement, de prix de revient, de recherche et d'expérimentation. Optimiser toutes ces contraintes n'est pas simple. Le plus souvent ces diverses possibilités d'amélioration, de perfectionnement très poussé, possibles en laboratoire ou en fabrication artisanale, ne peuvent être étendues à un échelon supérieur, pour des




Principe breveté le 12 Janvier 1940
par Manrico Compare, concernant
un haut-parleur pulsant




Principe théorique de la sphère pulsante

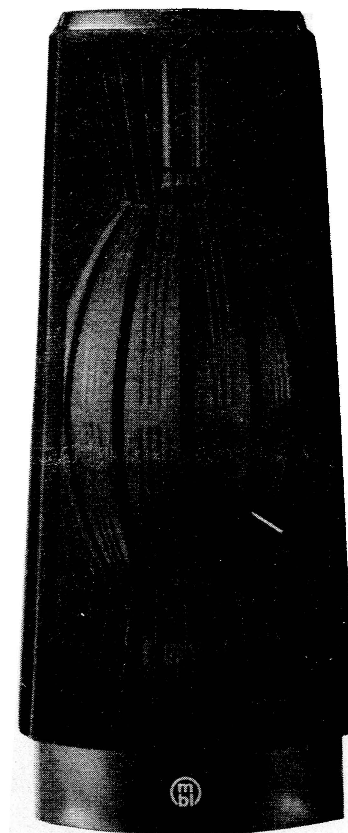


*Fig. 282 : Sphère pulsante, théorie et réalisations pratiques.*

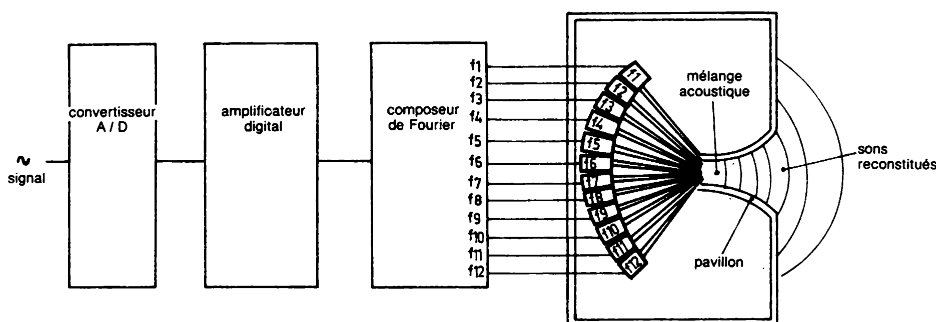



*Fig. 283 : Haut-parleur digital. Principe théorique.*

raisons économiques. En plus, si la Rolls-Royce existe pour la voiture, le Nagra pour le magnétophone, les équivalents en matière de haut-parleur sont très rares. Leur prix de revient prohibitif les rend pratiquement inabordables.

Avoir une connaissance étendue sur tout ce qui a été fait sur le haut-parleur, semble préférable à une spécialisation très poussée d'une partie du problème. C'est ainsi que naissent comme par hasard des systèmes de reproduction très évolués sur le plan de la qualité subjective, alors que d'autres ne satisfont que la mesure. On constate ainsi que les chercheurs qui ont travaillé de longues années sur le haut-parleur finissent toujours par obtenir un jour de bons résultats. Ceci est évidemment biaisé lorsqu'interviennent des raisons commerciales ou une obstination sur une idée préconçue. La réussite vient donc de cette synthèse que l'on pourrait qualifier « d'équilibrée ». Cette synthèse des connaissances est le point le plus important dans l'élaboration d'un haut-parleur ou d'un système. C'est ce qu'on appelle en anglais le « Know How ». Et, comme dans bien des métiers, la patience et la passion en sont certainement les aliments essentiels. L'électro-acoustique au service de la musique est certainement, pour le haut-parleur comme pour les autres maillons d'une chaîne de haute-fidélité, la base, le fondement de cette technologie au service de l'art.

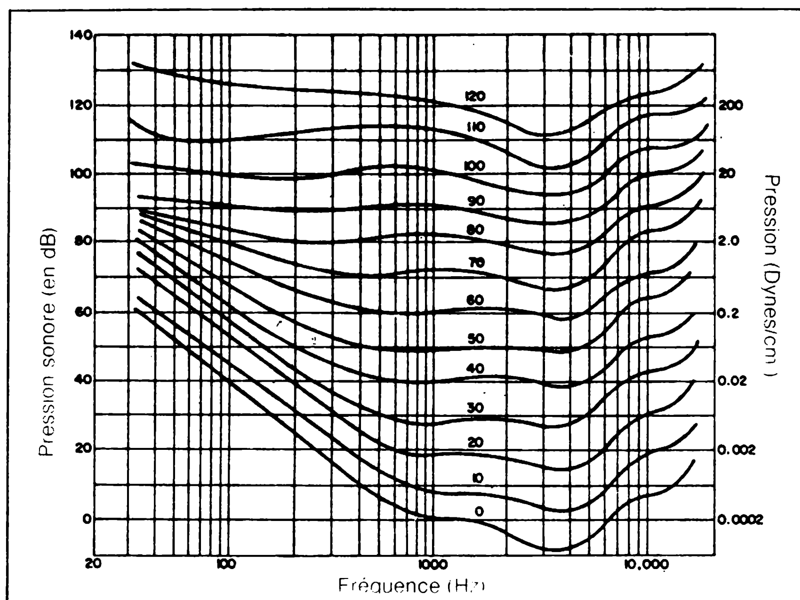
*Croire tout découvert est une erreur profonde;*
*c'est prendre l'horizon pour les bornes du monde.*

*A. Lemierre*

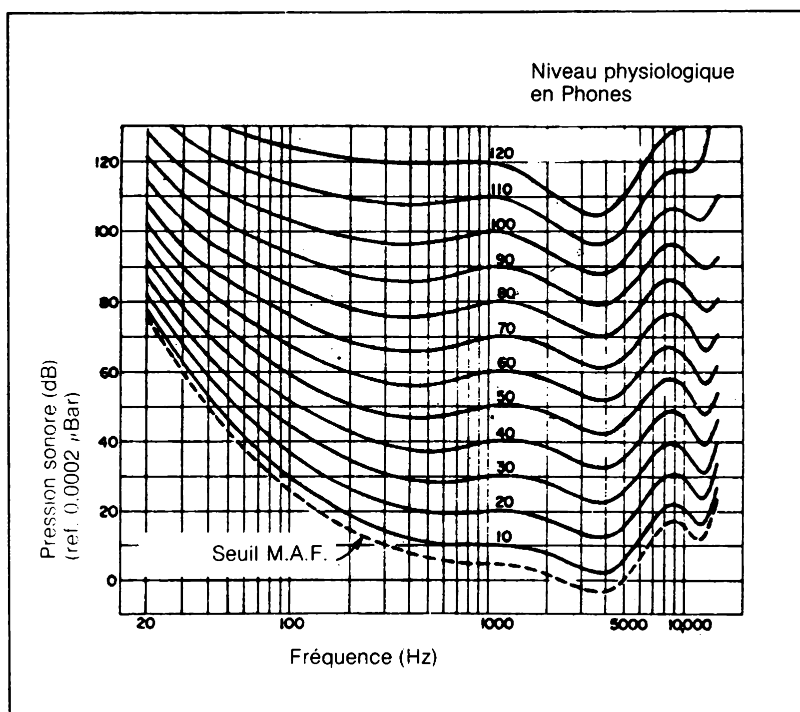
# Complément

## Acoustique, psycho-acoustique, physiologie sensorielle

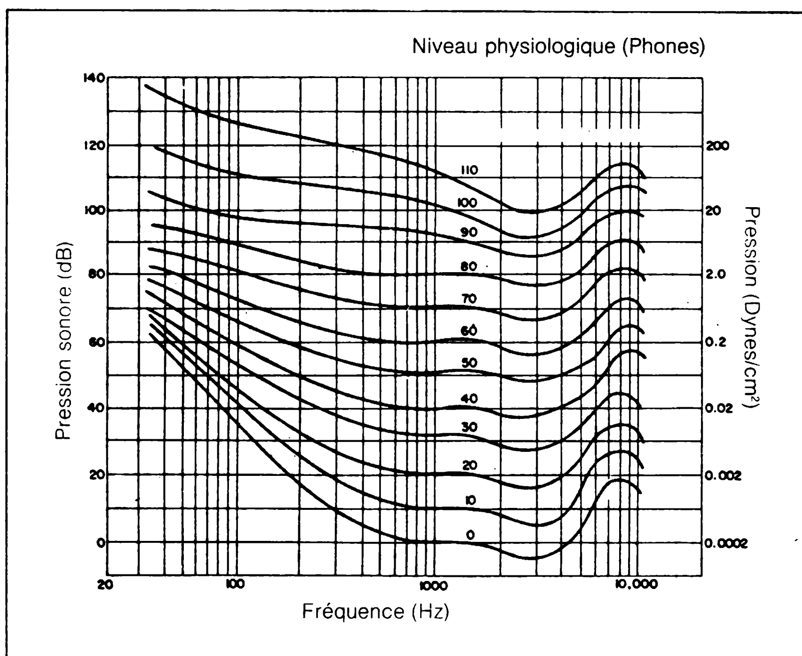
Parmi les divers problèmes relatifs à la reproduction électro-acoustique, celui de la métrologie acoustique, basée sur les réactions humaines de sensation auditive, est une science que les savants ont toujours cherché à mieux connaitre. L'oreille possède de nombreuses caractéristiques, souvent non-linéaires et difficiles à définir, à mesurer. Ces questions sont donc intimement liées à celles de la reproduction électro-acoustique. Ce sujet est très vaste. Il est en conséquence préférable de se reporter aux ouvrages spécialisés. Parmi ces questions, celles du niveau sonore subjectif, des corrections « physiologiques », celles concernant les « illusions » auditives, les effets de masque, de « hauteur subjective du son » sont autant de problèmes que l'on doit prendre en considération lors de l'élaboration d'un haut-parleur, d'une enceinte acoustique. On trouvera dans les pages suivantes plusieurs graphes et tableaux concernant ces questions. Plus loin, on trouvera d'autres informations concernant les sons musicaux ainsi qu'un très bref aperçu sur les propriétés d'absorption des matériaux utilisés couramment (traitement acoustique des pièces d'écoute).



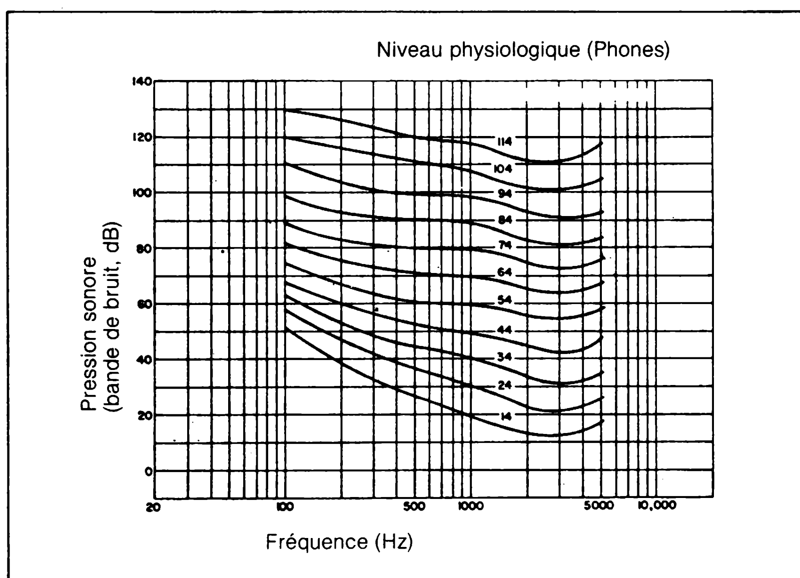

*Caractéristiques de correction physiologique, selon Fletcher et Munson*




*Caractéristiques de correction physiologique, selon Robinson et Dadson*

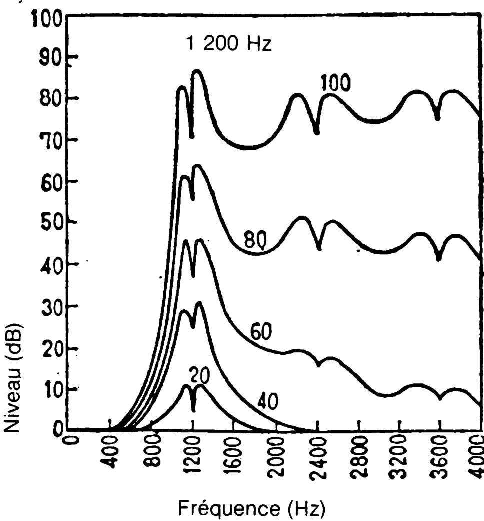


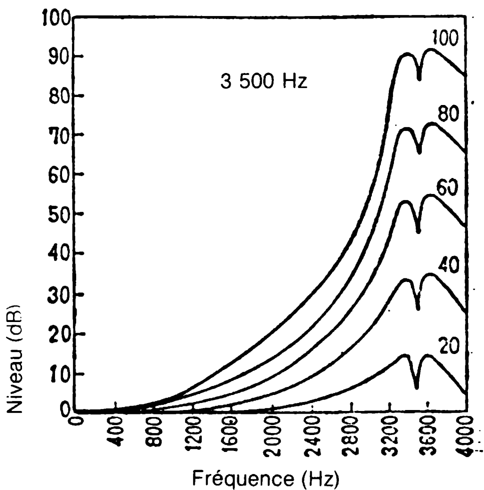

*Caractéristiques de correction physiologique, selon Churcher et King*



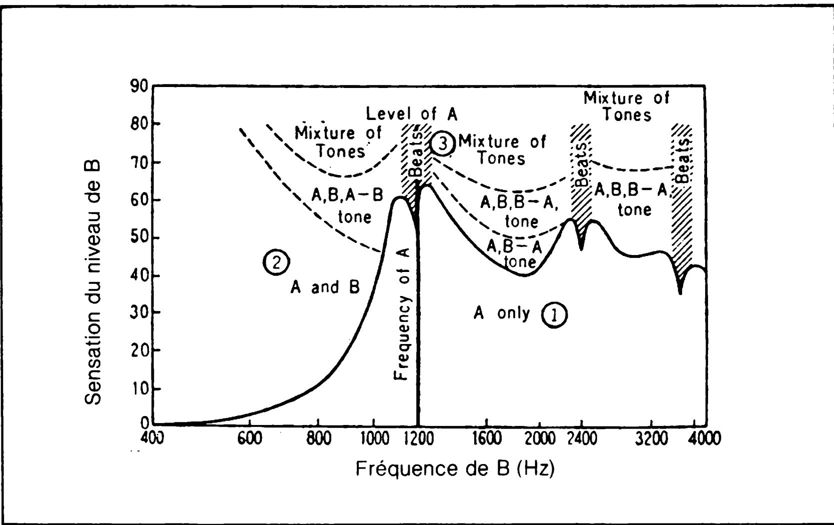

*Caractéristiques de correction physiologique, selon Pollack (obtenues à partir de bandes de bruit filtré)*

*Effet de masque d'un signal de 1 200 Hz sur la bande de fréquences 400 Hz - 4 000 Hz, pour différents niveaux (exprimés en dB).*

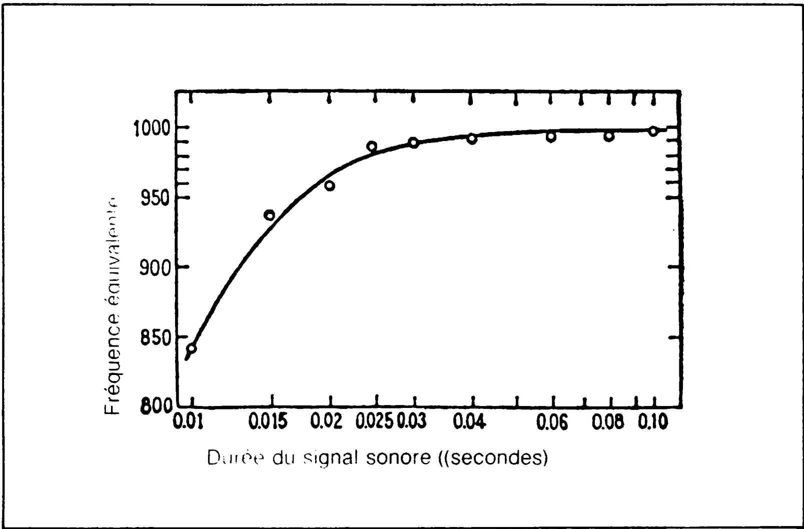


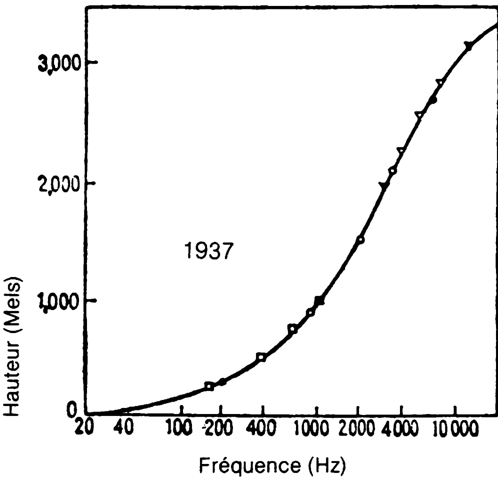

*Effet de masque, variation selon la fréquence (ici de 3 500 Hz)*

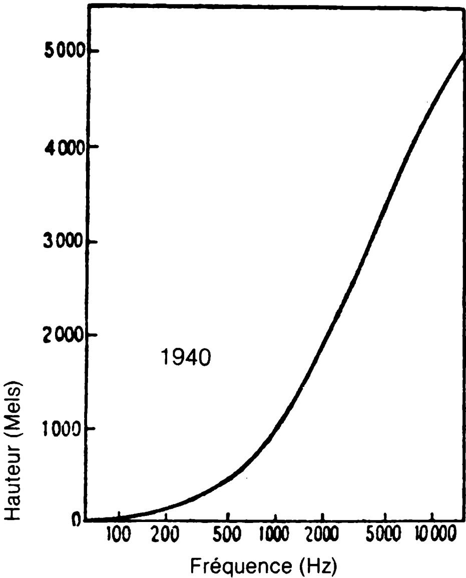



*Effet de masque d'une fréquence sur une autre, en fonction des niveaux relatifs de chacun (effet de « masque » (zones hachurées), effet de battements (zones hachurées). Description de cet effet pour une fréquence de 1 200 Hz, niveau 80 dB*

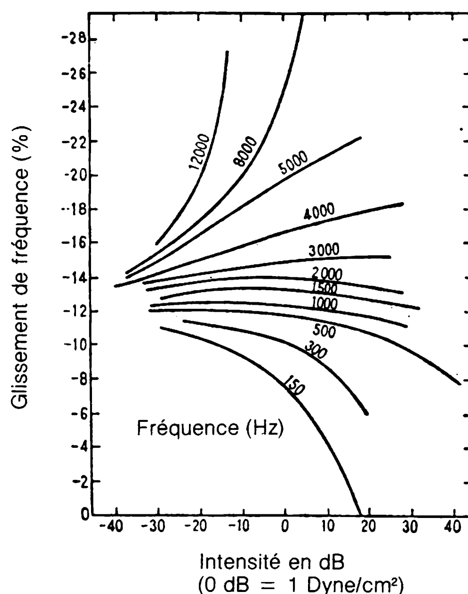



*Hauteur du son perçu, en fonction de la durée du signal*




*Relation Mels/fréquence, selon des travaux datant respectivement de 1937 et de 1940.*



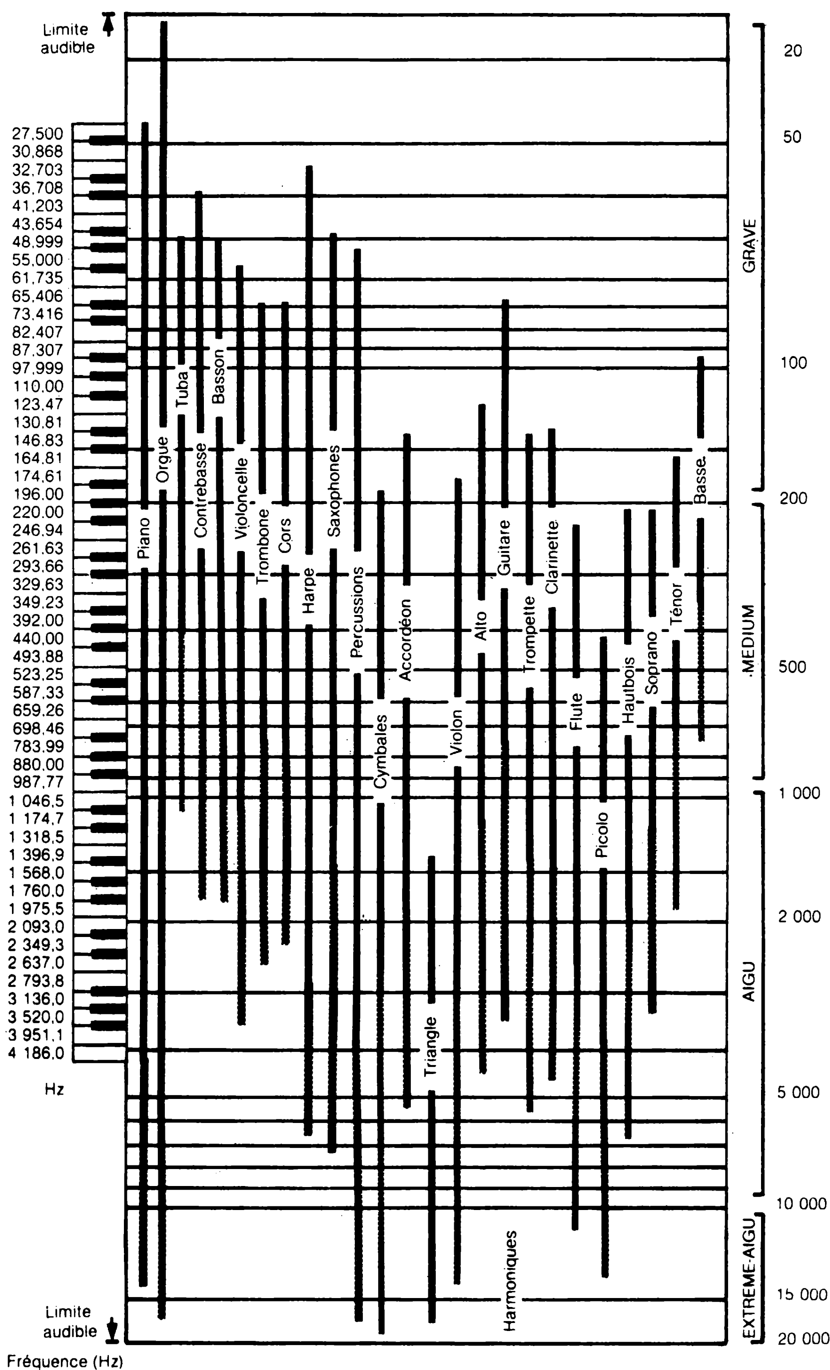

*Hauteur subjective perçue, en fonction du niveau acoustique*

| Matériau | Coefficient d'absorption pour les fréquences de : | | |
|---|---|---|---|
| | 125 Hz | 1 kHz | 4 kHz |
| Bois peint | 0,05 | 0,03 | 0,029 |
| Mur crépi | 0,01 | 0,04 | 0,018 |
| Moquette | 0,15 | 0,46 | 0,36 |
| Feutre 20 mm | 0,18 | 0,58 | 0,61 |
| Parquet bois | 0,03 | 0,11 | 0,18 |
| Glaces et vitres | 0,03 | 0,03 | 0,019 |
| Briques | 0,015 | 0,028 | 0,05 |
| Rideau velours | 0,10 | 0,51 | 0,45 |
| Rideau léger | 0,05 | 0,17 | 0,43 |
| Lit | 0,50 | 0,90 | 0,72 |
| Laine de verre 10 mm | 0,50 | 0,89 | 0,71 |
| Plafond plâtre | 0,04 | 0,039 | 0,079 |
| Sol en marbre | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Sol en carrelage | 0,01 | 0,012 | 0,012 |

*Coefficient d'absorption de quelques matériaux couramment utilisés dans les locaux domestiques (auditoriums, pièce d'écoute)*

| Caractéristiques | Unités |
|---|---|
| Impédance nominale | Ω |
| Fréquence de résonance | Hz |
| Coefficient de surtension électrique | $Q_{ES}$ |
| Coefficient de surtension mécanique | $Q_{MS}$ |
| Coefficient de surtension total | $Q_{TS}$ |
| Energie magnétique du moteur | Ws |
| Facteur de force du moteur | $Na^{-1}$ |
| Induction dans l'entrefer | T |
| Flux dans l'entrefer | Wb |
| Puissance nominale | W |
| Efficacité | dB/m/W |

*Quelques caractéristiques principales du haut-parleur, avec les unités.*

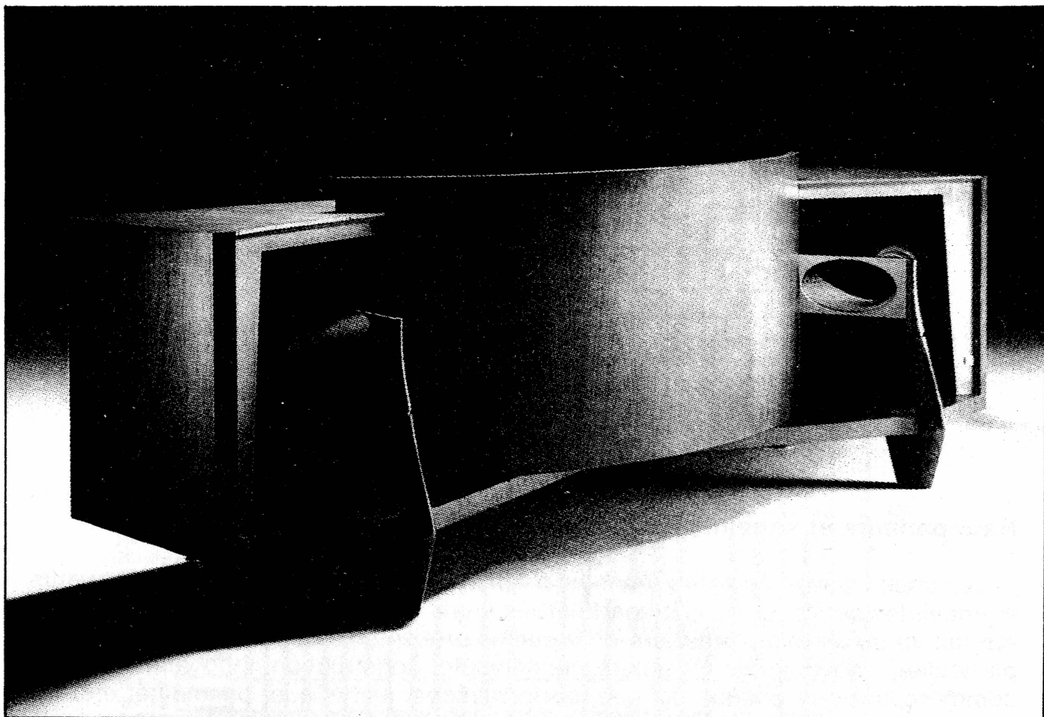



***Etendue des spectres de fréquences couverts par les instruments de musique. Les zones en hachuré correspondent aux harmoniques des sons produits.***

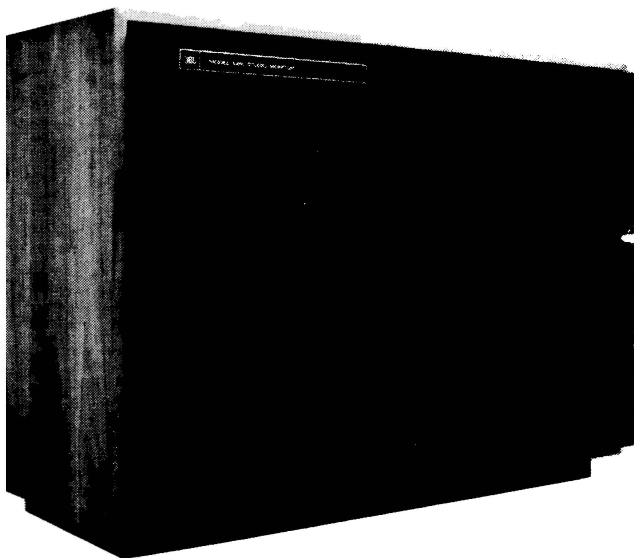
## Haut-parleurs et enceintes acoustiques

Les pages suivantes concernent les productions commerciales de haut-parleurs et enceintes acoustiques, la plupart parues entre 1950 et 1980. Bien entendu, il n'a été fait ici qu'un choix arbitraire de modèles présentant, selon l'auteur, un intérêt particulier : moyens mis en œuvre, technologie, construction, innovation, succès commercial à une époque donnée, performances, esthétique, originalité, etc. On trouvera de nombreux modèles d'origine américaine, dont certains à pavillon, destinés à la sonorisation des grands espaces. On trouvera aussi quelques haut-parleurs particulièrement imposants (construction, circuits magnétiques). Par contre, on ne parlera pratiquement pas des enceintes de type « Bookshelf », très nombreuses, la plupart parues après 1970, que les lecteurs connaissent fort bien.

L'auteur s'excuse d'avance auprès des constructeurs ne figurant pas dans les pages suivantes, lesquelles ne sont pas une liste complète de tous les constructeurs mondiaux, mais seulement un échantillonnage de ce qui a été jugé essentiel.

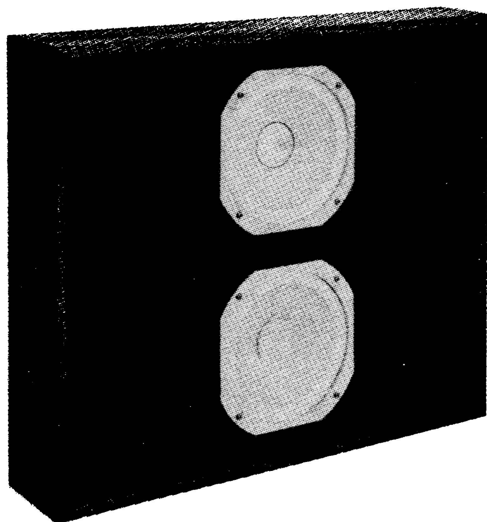


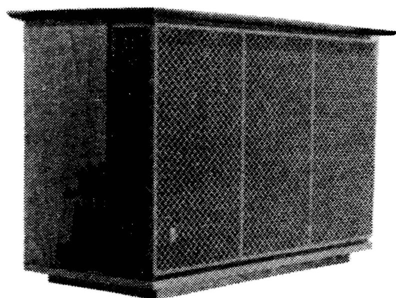
**J.B.L., modèle « PARAGON »**
**réf. D44000WXA**
**(H.P. LE 15H, 376, H 5038P, 075 x 2).**



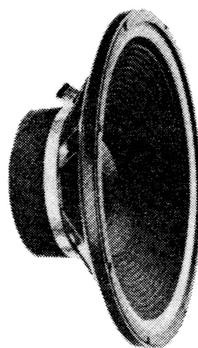
**J.B.L., modèle 4350**

Enceinte J.B.L. « Trimline »
(U.S.A., 1960)

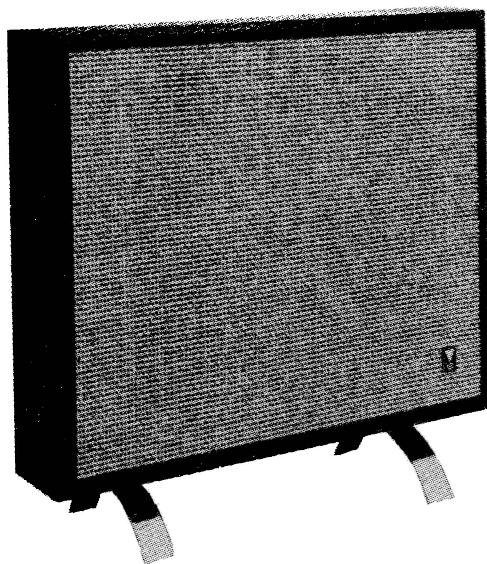


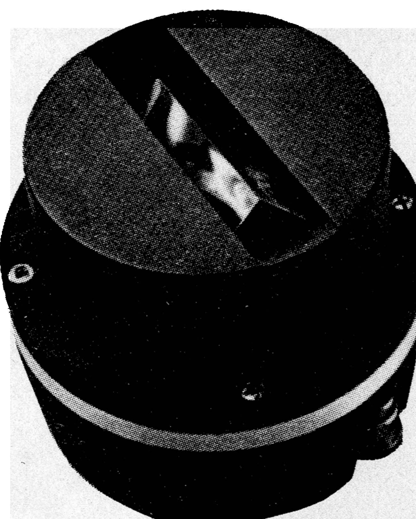


Enceinte J.B.L. « Olympus »

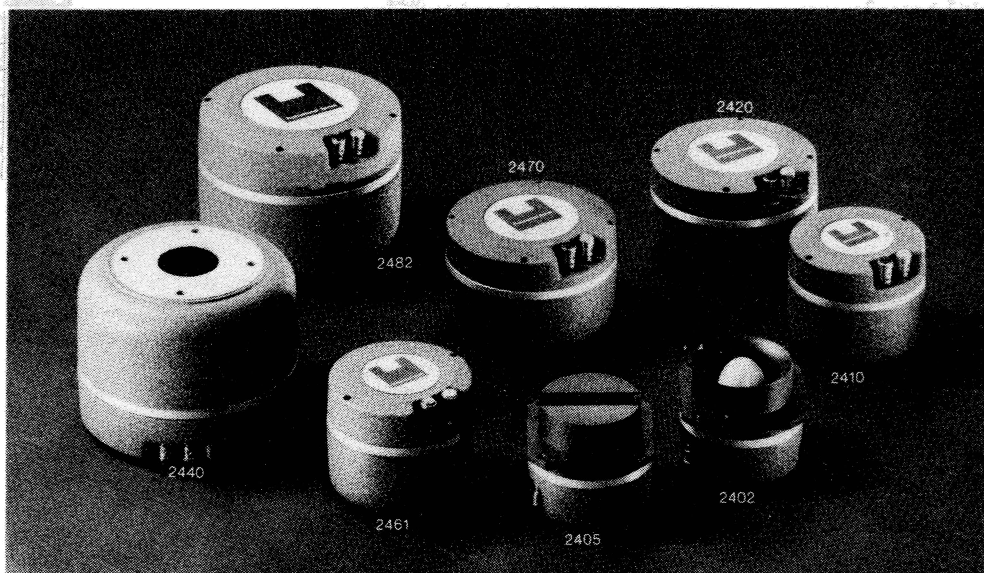


Haut-parleur J.B.L. LE 15A



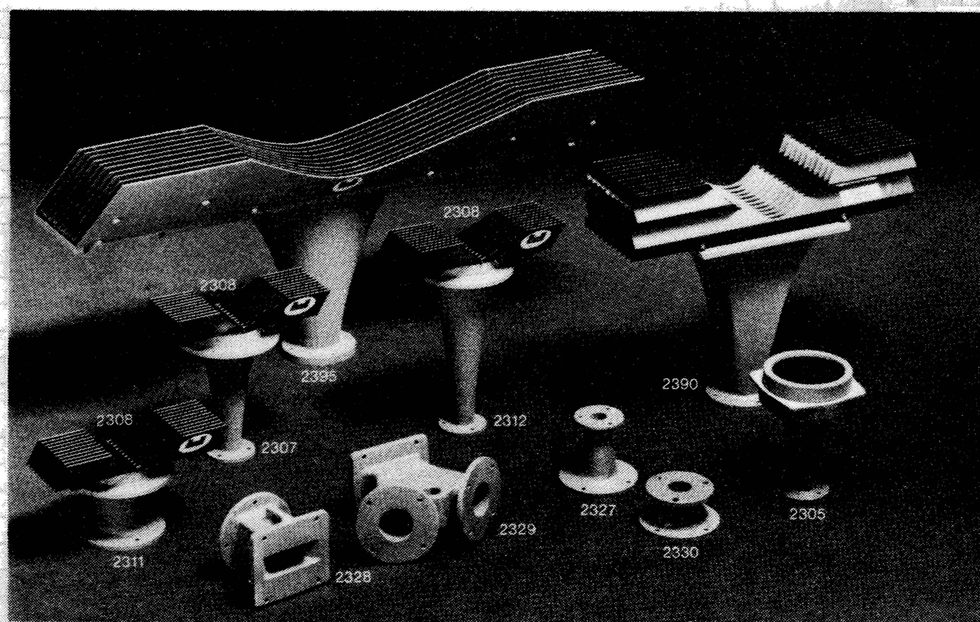


Tweeter J.B.L.
modèle 077 (2405)



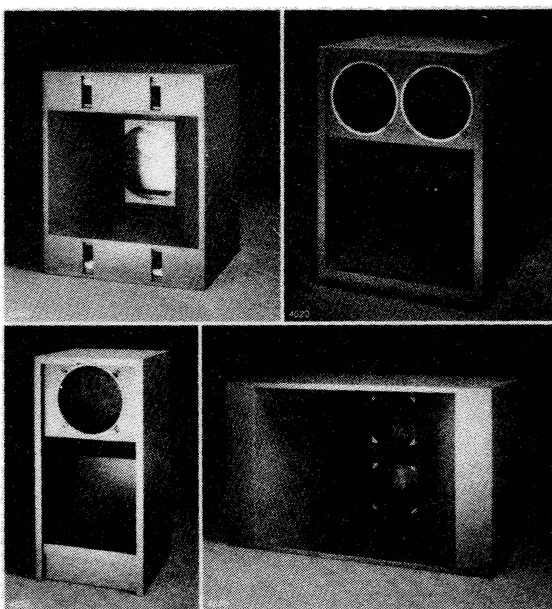

**Chambres de compression J.B.L.**
**(modèles 2482, 2470, 2420, 2440,**
**2461, 2405, 2402, 2410)**

**Pavillons, lentilles acoustiques**
**et adaptateurs J.B.L.**

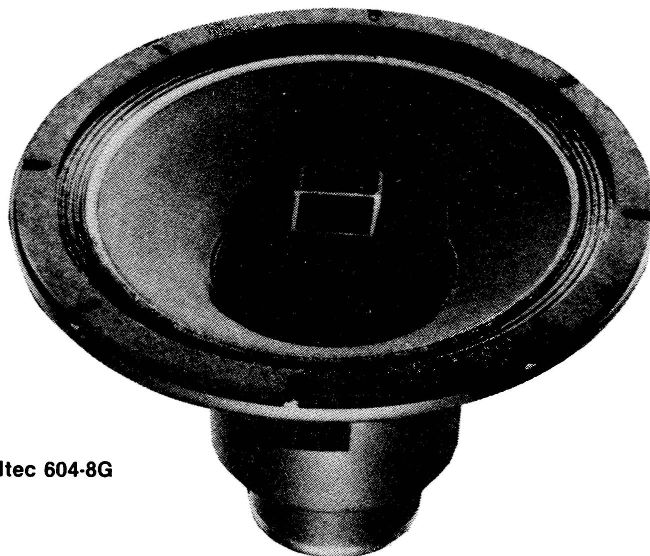




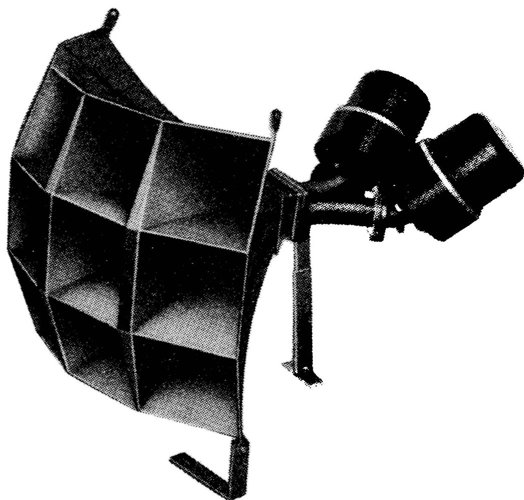
**Haut-parleurs grave J.B.L.
(2205, 2220, 2231,
2215, 2202, 2290)**



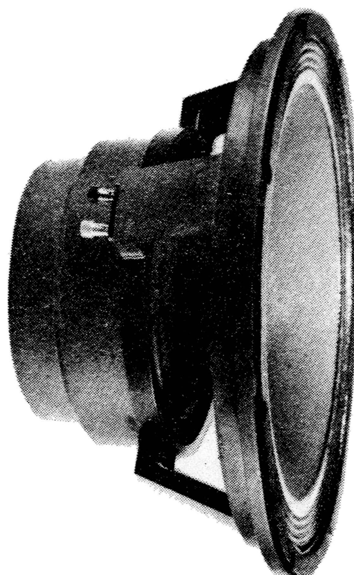
**Enceintes à pavillon J.B.L.
(4560, 4520, 4530, 4550)**



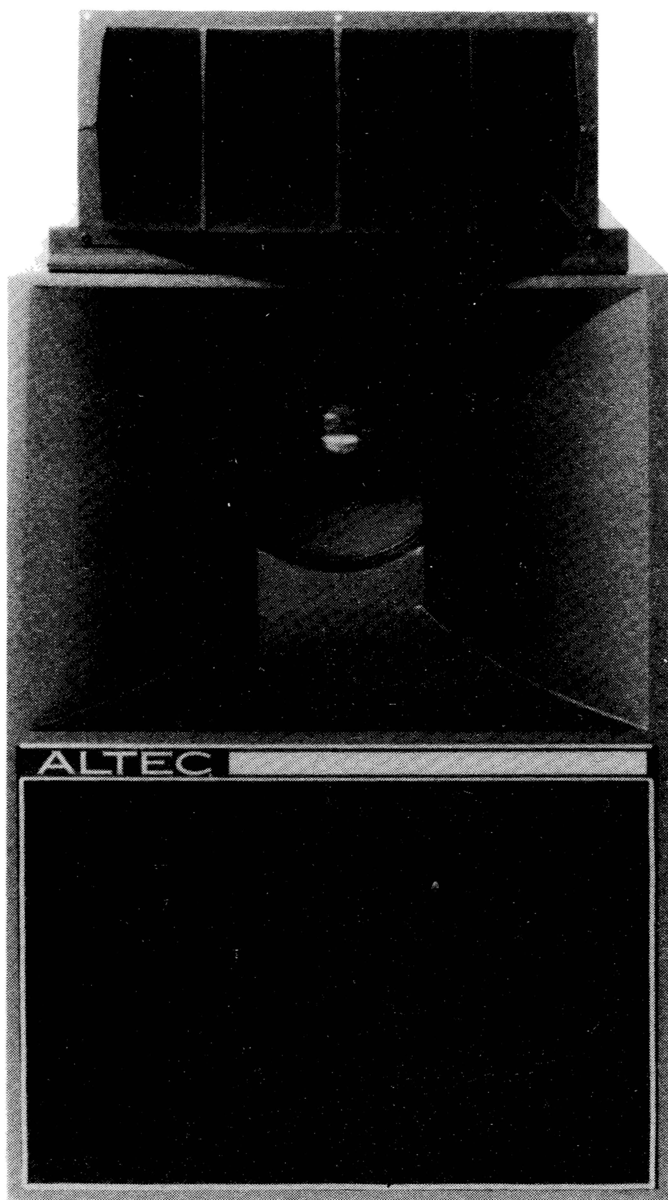
Haut-parleur coaxial Altec 604-8G



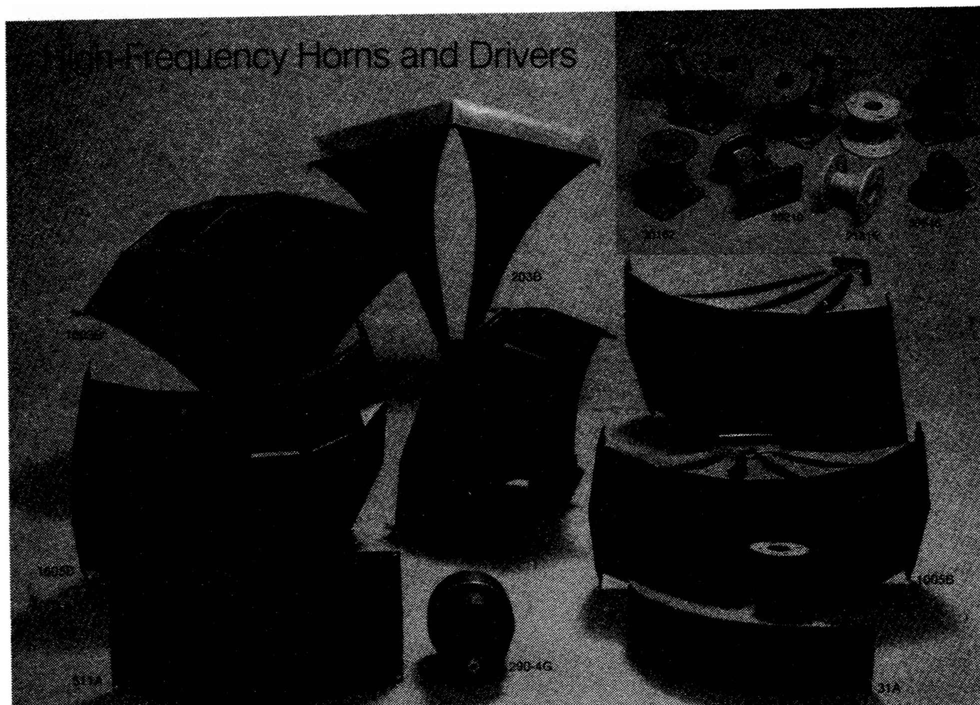
Pavillon Altec «Multicellular Horn»
(double moteur)



Haut-parleur de grave Altec
(modèle 414 - 8C)




**Enceinte Altec**
**« La voix du théatre », réf. A 7X**

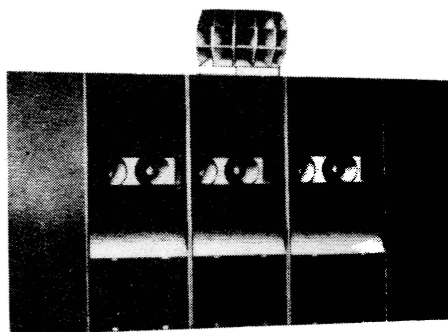


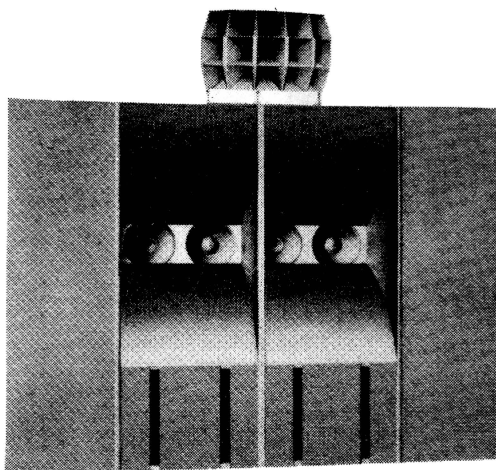

**Haut-parleurs à pavillon Altec (pavillons 203B, 805B, 1003B, 1505B, 511A, 803B, 1005B, 31A**

**Haut-parleurs Altec (416-8B, 414-8C, 411-8A 755E, 515B)**

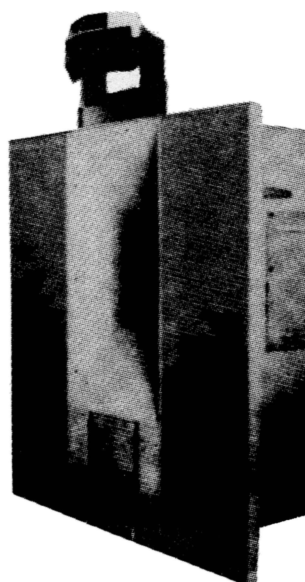


Enceinte de sonorisation Altec
modèle A1X - A1

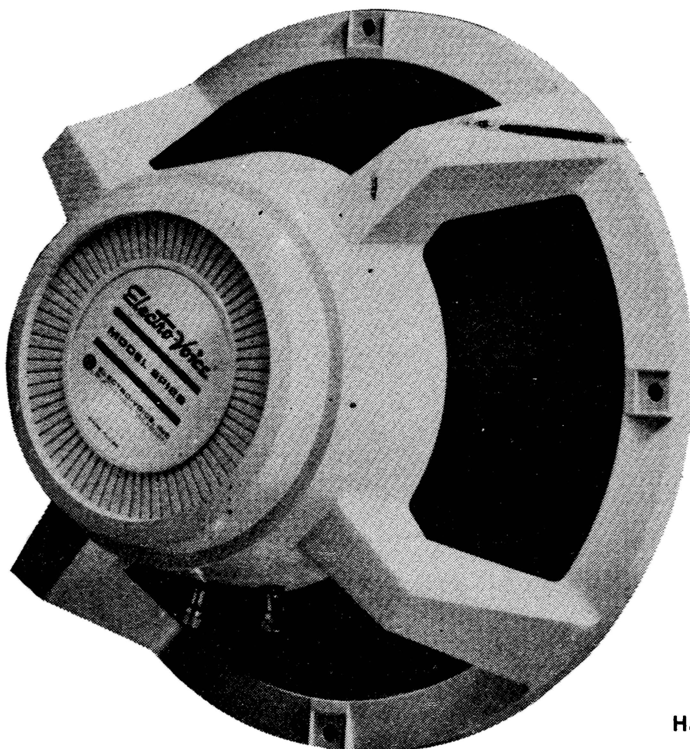




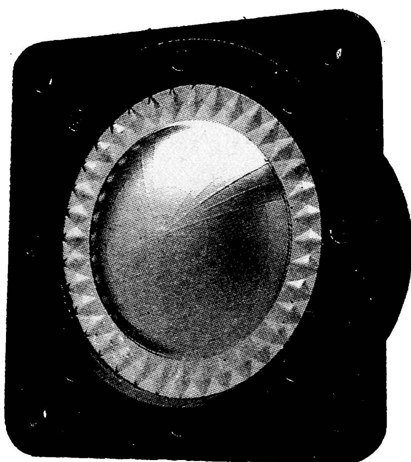
Enceinte de sonorisation Altec
modèle A2X - A2



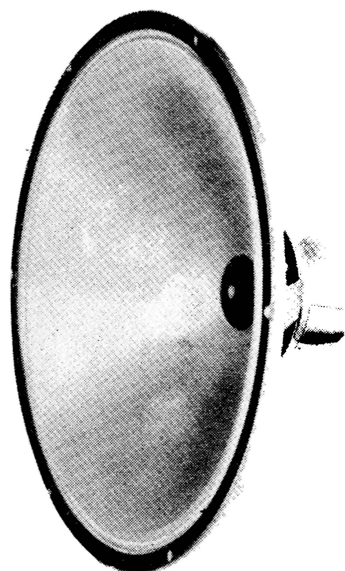
Enceinte de cinéma « Westrex »
réf. 5010C « Back Stage Auditorium »



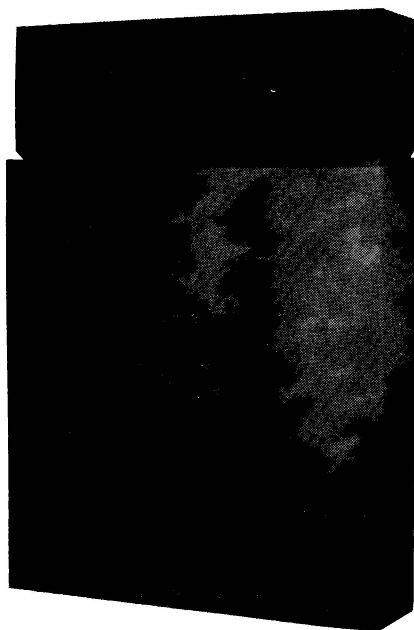

Haut-parleur Electro-Voice
modèle 8P 12B



**Haut-parleur à dôme JBL (USA) de la série XLP avec membrane métallique à surface embossée.**

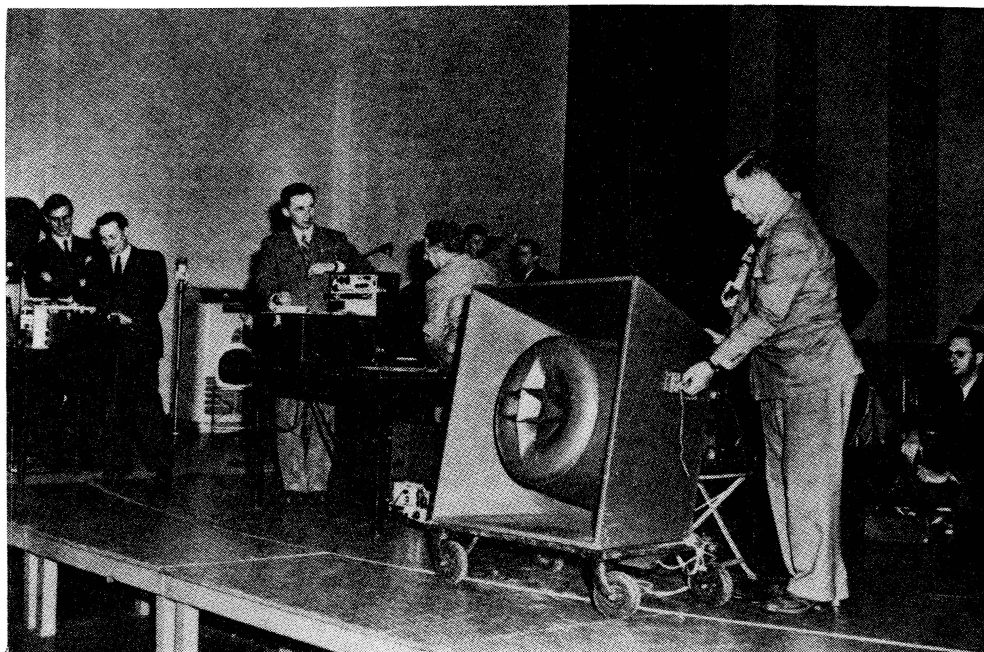


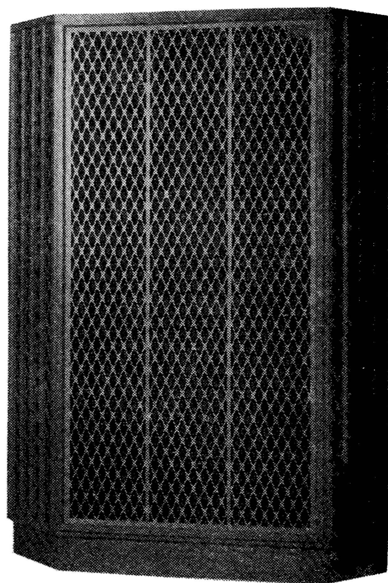
**Haut-parleur grave Electro-Voice diamètre 76 cm, ref. « 30W »**



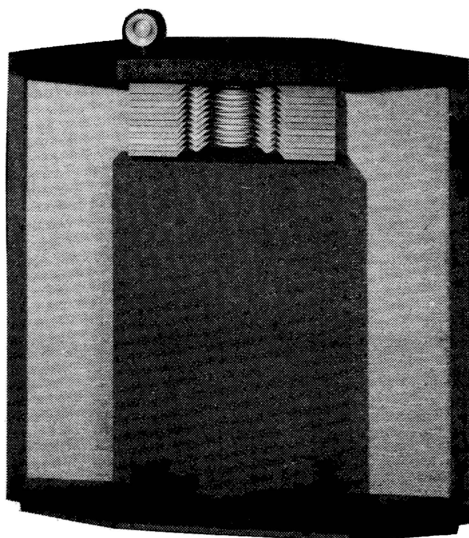
Enceinte à pavillon replié
« Klipschorn II »
(Klipsch & Associates, U.S.A.)

Enceinte à pavillon replié « Western Electric »
modèle « The Tub » (pavillons repliés coaxiaux)
(U.S.A., environs de 1938)

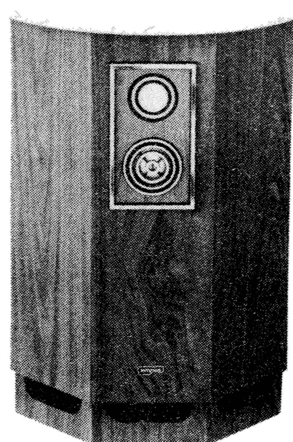




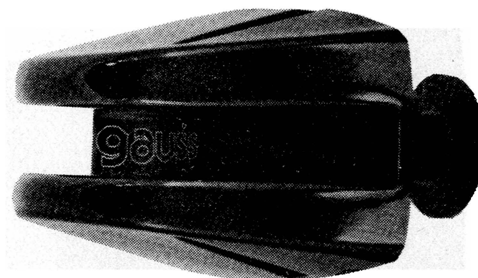
**Enceinte Tannoy « Autograph »**
**(Tannoy, G.B.)**



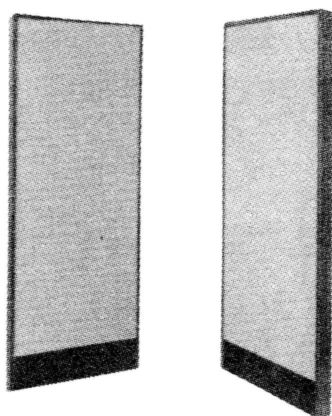
**Enceinte J.B.L. « Hartsfield »**
**(J.B.L., U.S.A.)**



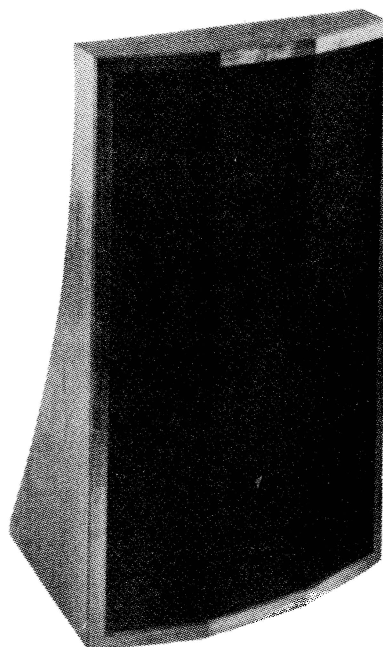
**Enceinte Empire**
**modèle 7500 M**



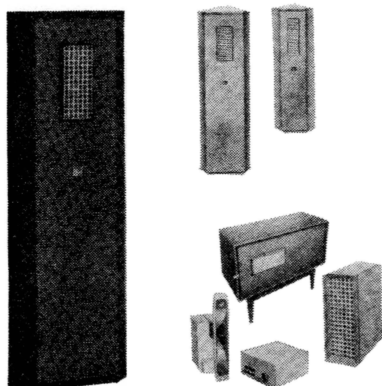

Pavillon Gauss (U.S.A.)
modèle 4140



Panneaux Electrostatiques
Acoustech X (U.S.A., 1960)

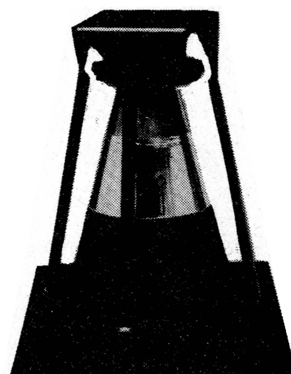


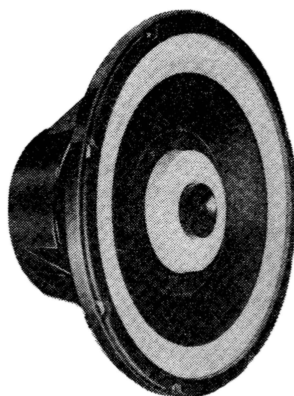
Haut-parleur électrostatique
« Acoustat X » (U.S.A)
(large bande, amplificateur incorporé)



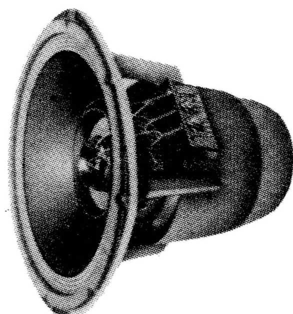
Enceintes Ionovac (U.S.A.)
(tweeter ionique, licence Klein, 1961)

Haut-parleur Ohm (U.S.A.)

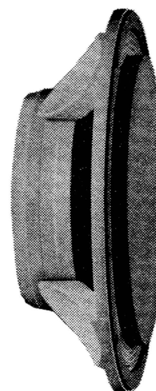




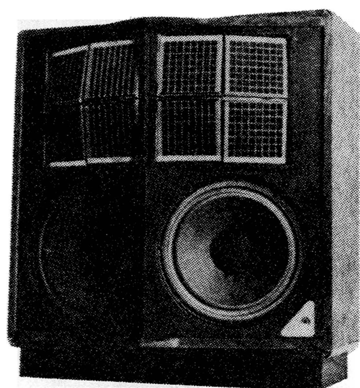
Haut-parleur University (U.S.A.)
modèle « Diffaxial »



Haut-parleur Utah (U.S.A.)
modèle Cascade

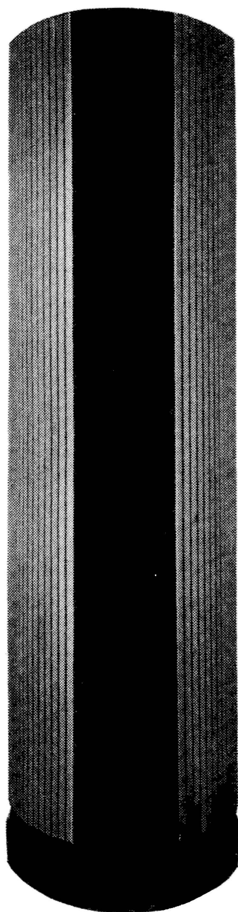


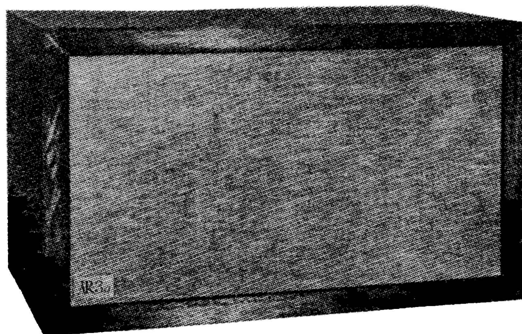
Haut-parleur Jensen (U.S.A.)
modèle 3P « Polytec »
(membrane plane)



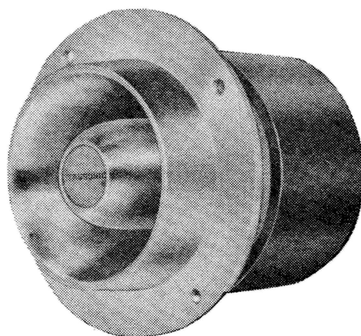
Enceinte Janszen (U.S.A.)
modèle Z 824
(tweeter électrostatiques
push-pull)

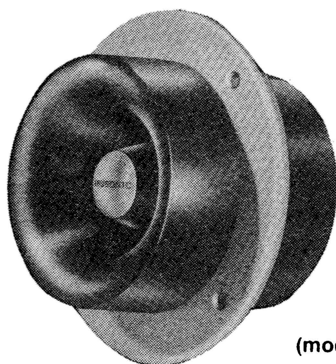
Enceinte électrostique Beveridge (U.S.A.)
modèle « System 3 »



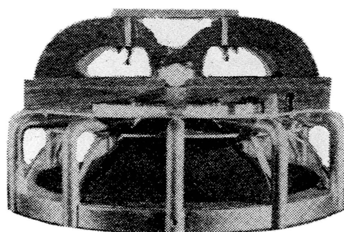


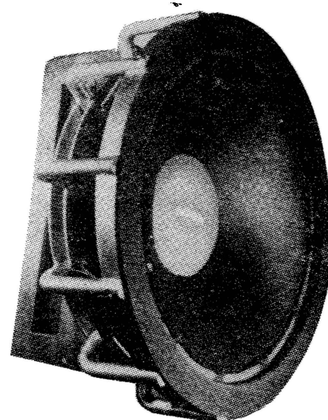
Enceinte acoustique Acoustic Research (U.S.A.)
Modèle AR 3A (suspension acoustique, 1961)





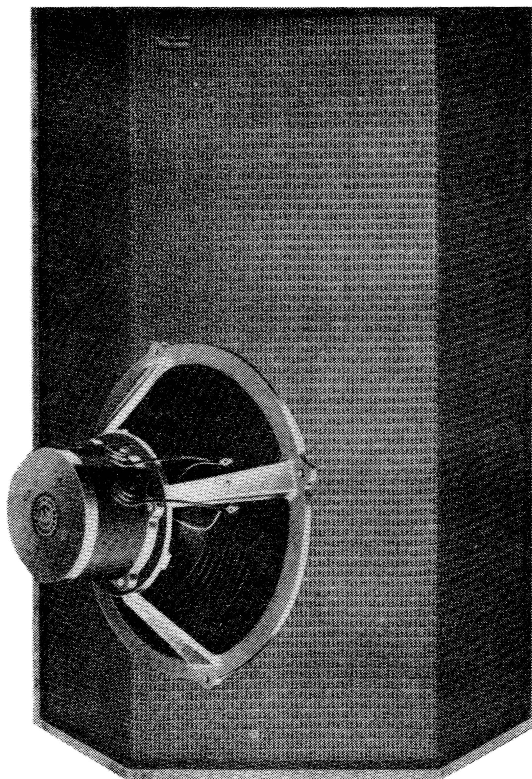
Tweeters Stephens (U.S.A)
(modèles Trusonic 5KT Toroïd, RT1 Ring)

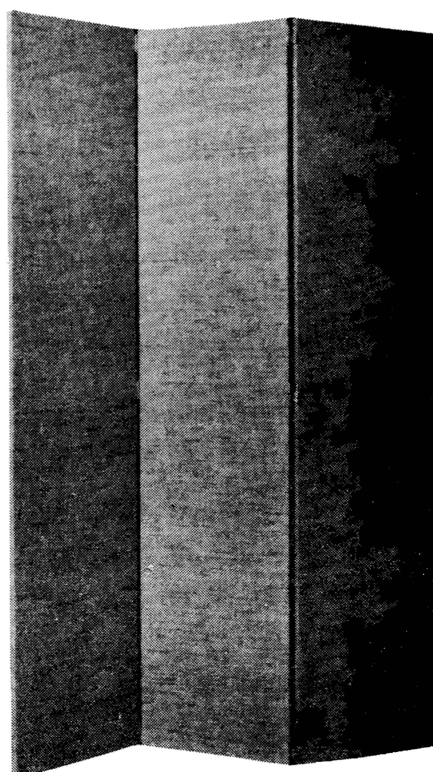




Haut-parleur de grave américain
(modèle expérimental imposant (plus de 30 kg)
paru dans la revue américaine « Audio »
de juillet 1962).

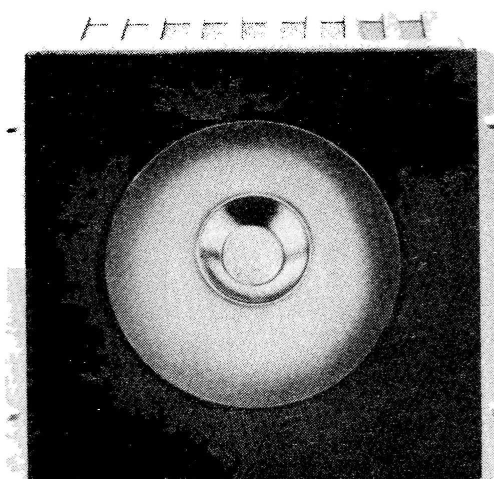
Enceinte Wharfedale
modèle « Airedale »
et haut-parleur grave
« W 15RS »



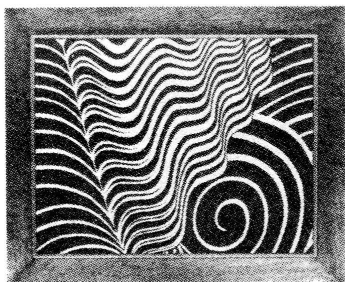


Panneaux Magnéplanar (U.S.A.)
(électrodynamique, diaphragme plan)

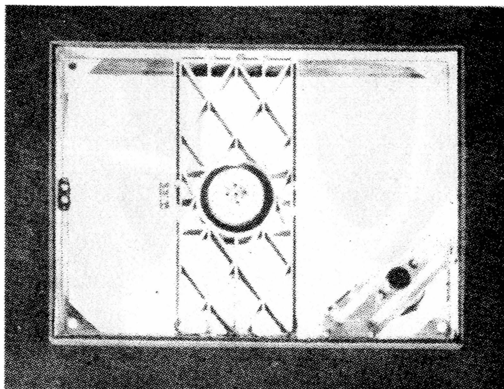
Haut-parleur Jordan Watts (G.B.7
(module large bande,
diaphragme métallique)



Enceinte Fisher (U.S.A.)
réf. PL-6 (diaphragme, plan, 1973)



Dos

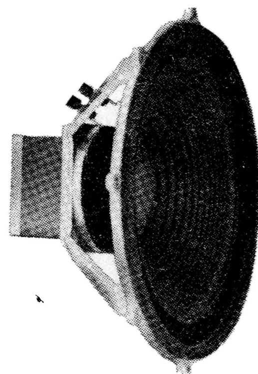


Face



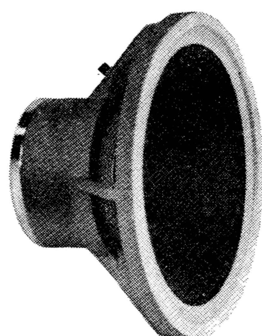
Baffle KEF (G.B.)
modèle K1 (1961)
(diaphragme plan)

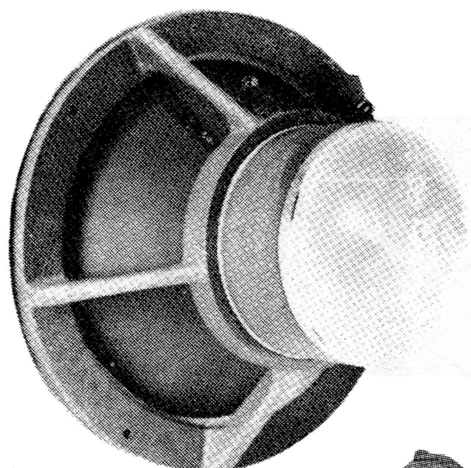
Haut-parleur Wharfedale
modèle WFR 15 (HP grave)



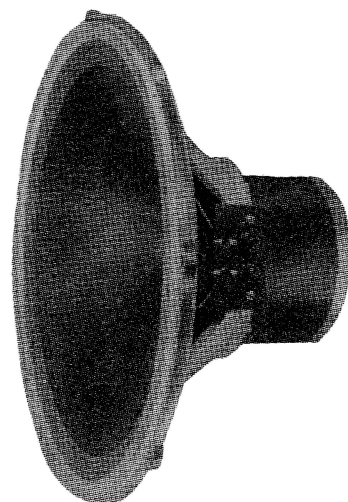


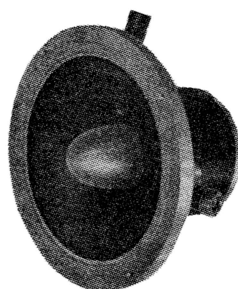
Enceinte Wharfedale
réf. Denton 2XP, Linton 3XP
détail du haut-parleur médium



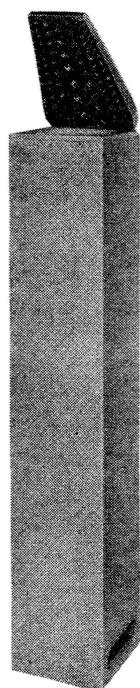


Haut-parleur Cabasse (France)
modèle grave 36 II CX (1968)

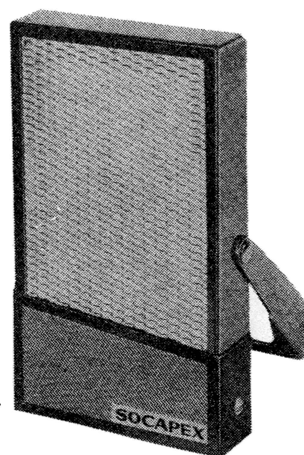




Haut-parleurs Véga (France)
réf. 340 ACTLB (grave) et
Médomex 15 (médium) (1968)



Enceinte Clevox (France)
avec diffuseur

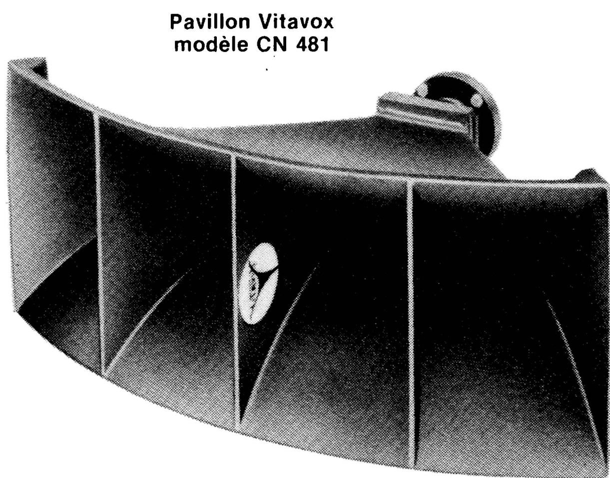


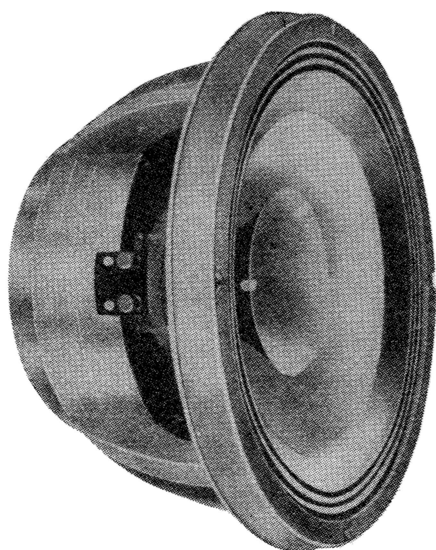

Microphone Socapex (France)
(principe reversible,
licence Gamzon)



Enceinte KEF (G.B.)
modèle 105-2

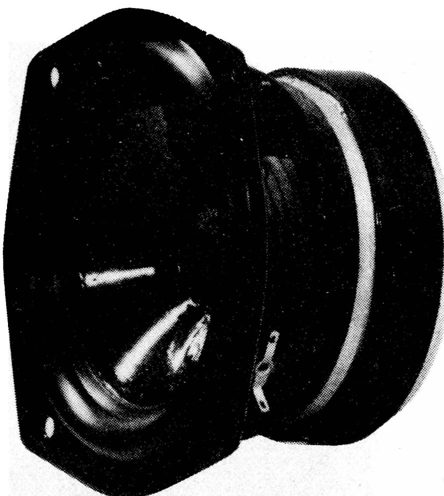
Pavillon Vitavox
modèle CN 481

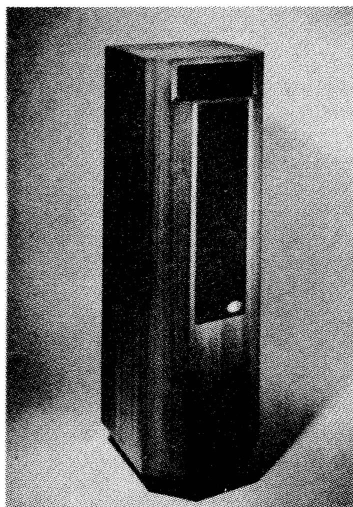


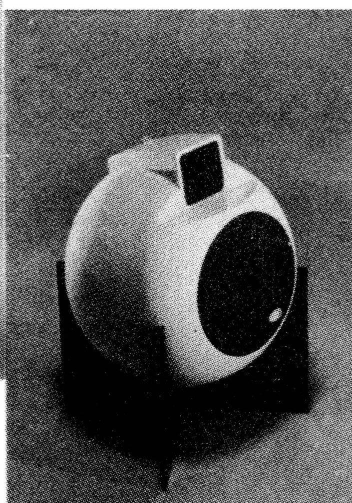


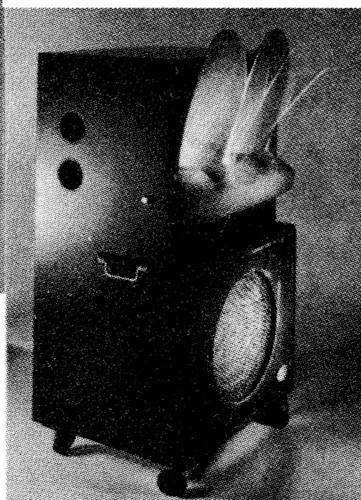
Haut-parleur Goodmans (G.B.)
réf. « Axiom 301 »

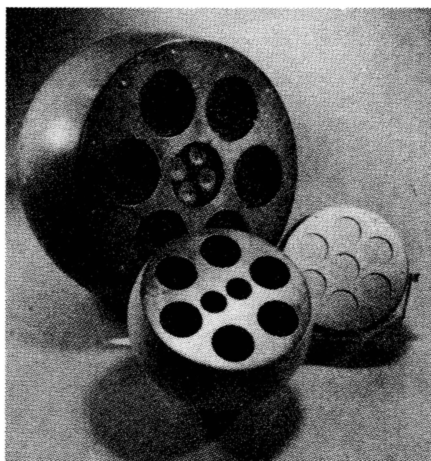
Haut-parleur grave-médium
diamètre 13 cm, marque Focal (France)
double bobine, membrane Néoflex
modèle 5N 401-DB







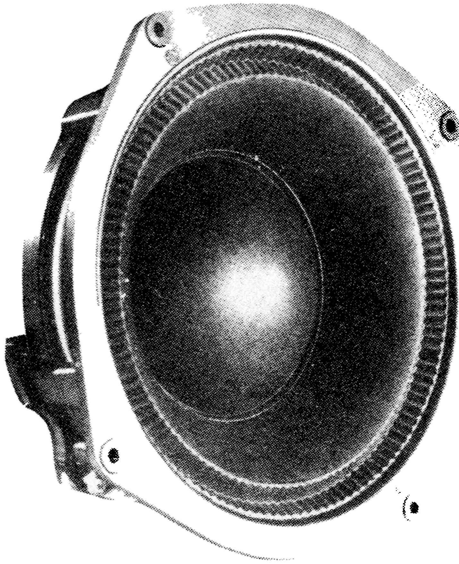




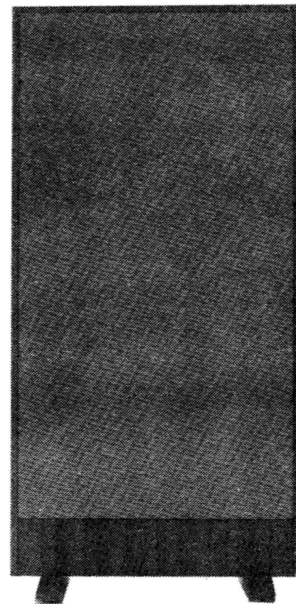
Enceintes Elipson (France)
réf. Prestige, AS 402, et
modèles de studio

Tweeter piézo-électrique Pioneer (Japon)
séries « High-Polymer » (1973)

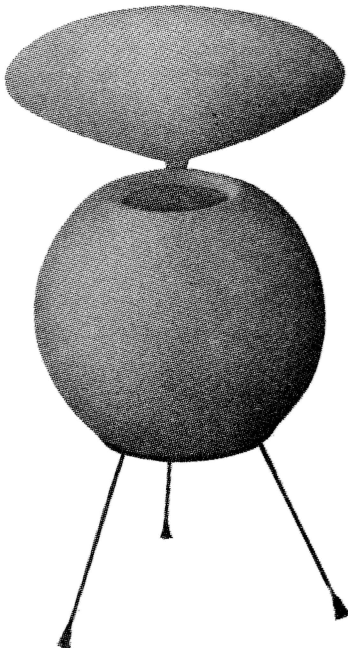




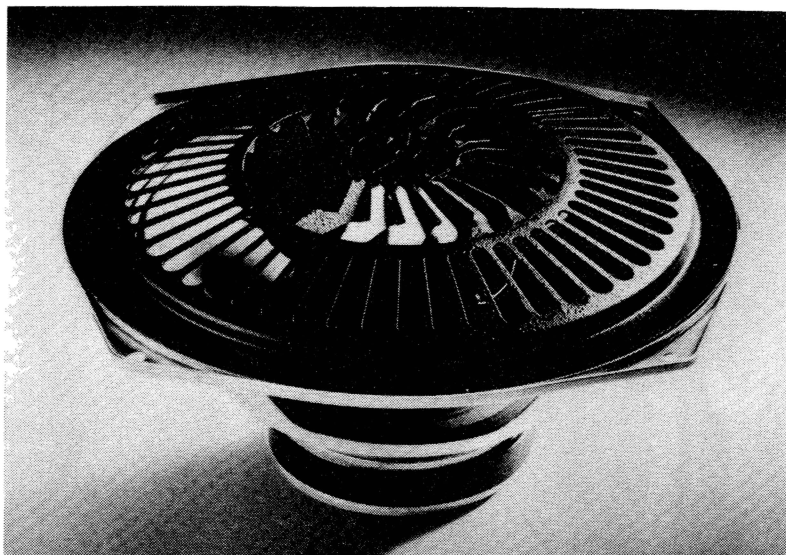
Haut-parleur grave Hitachi (Japon)
modèle L- 200
(suspension gaufrée, 1968)



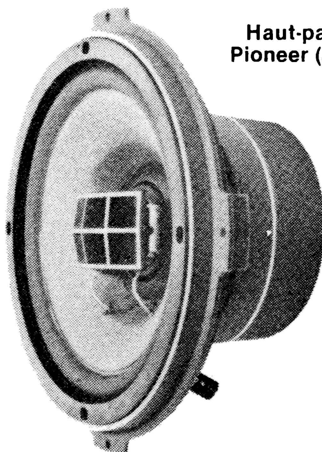
Haut-parleur électrostatique Stax (Japon)
modèle ESS 4A (1970)



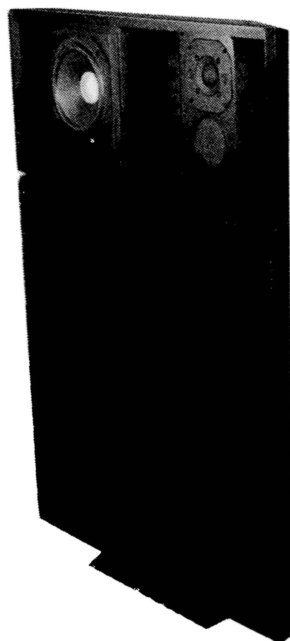
Enceinte Elipson (France)
modèle Chambord (1968)

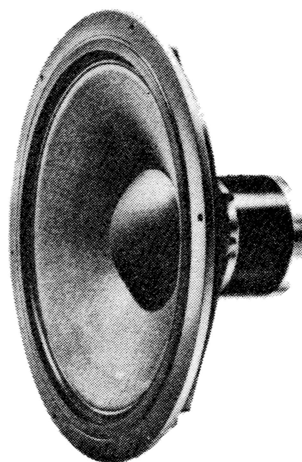


**Haut-parleur coaxial**
**Siemens (R.F.A.)**
**réf. C 72233-A 10 A-7**
**« Coaxial »**



**Haut-parleur coaxial 20 cm**
**Pioneer (Japon) ref. PAX - A20**

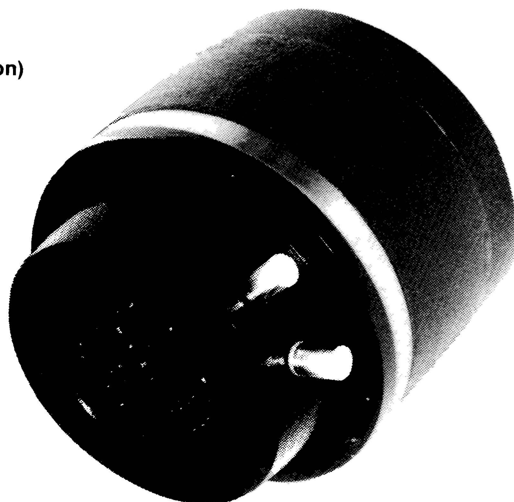




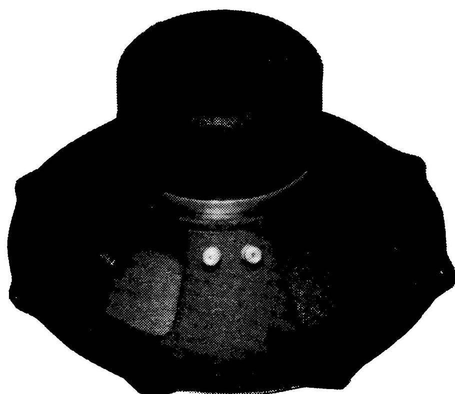
**Haut-parleur grave de 63 cm**
**Pioneer, ref. PW - 63S**

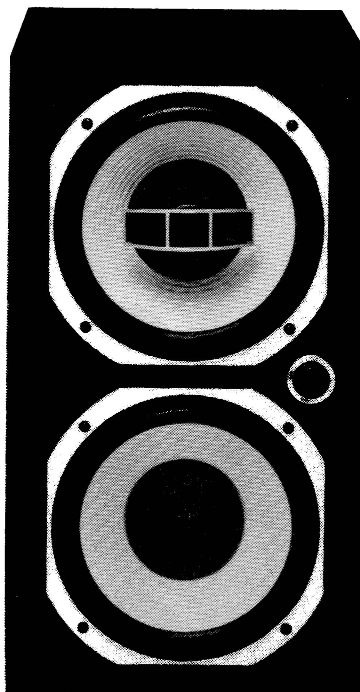
**Enceinte asservie**
**3 A (France)**
**modèle « La Référence »**

Moteur médium-aigu Onken (Japon)
réf. OM 455 « Esprit » (1979)



Haut-parleur grave Onken (Japon)
modèle 38 cm (1974)

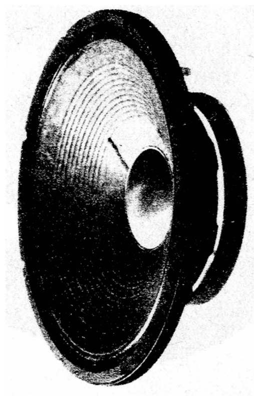




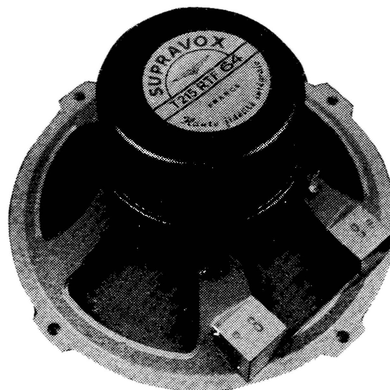
Enceinte Kenwood (Japon)
réf. LS 770

Haut-parleur Hawk (Japon)
moteur à excitation (1938)

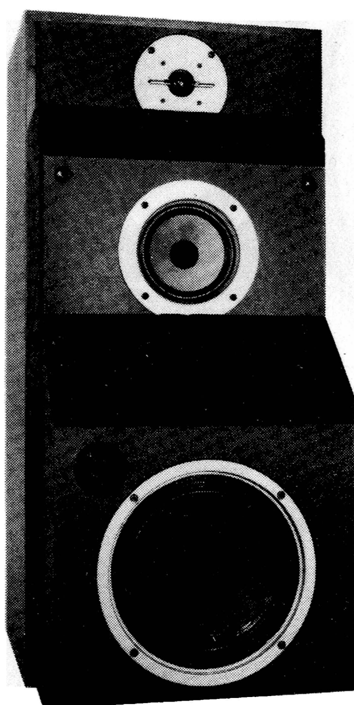




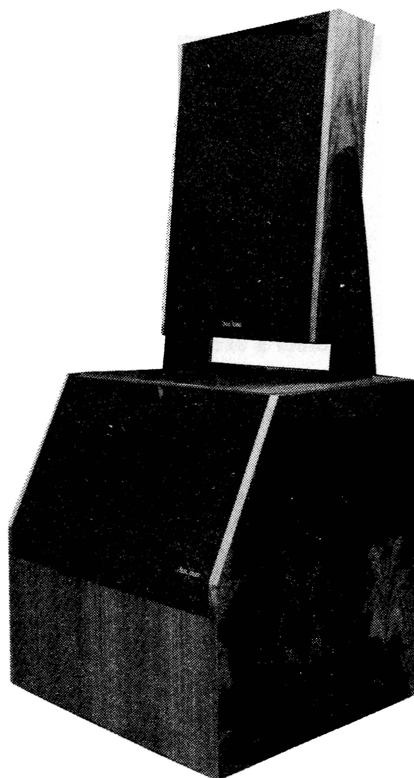
**Haut-parleur grave 38 cm**
**Audax (France)**
**modèle PR 38**



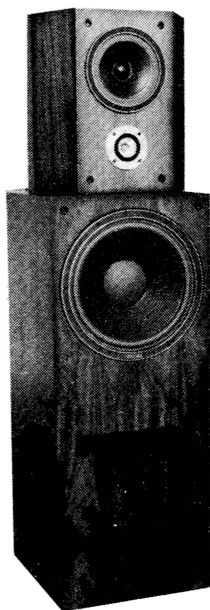

**Haut-parleur large bande**
**Supravox (France)**
**modèle T 215 RTF 64**



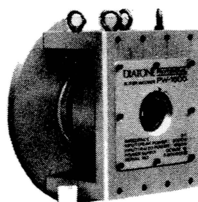
**Enceinte trois voies**
**Siare (France)**
**modèle « Delta 400 »**

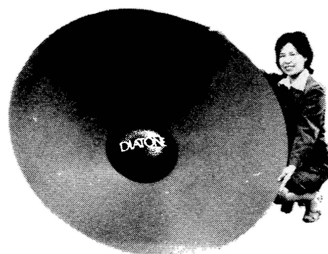


**Enceinte 4 voies**
**Phonophone (France)**
**modèle « BG »**

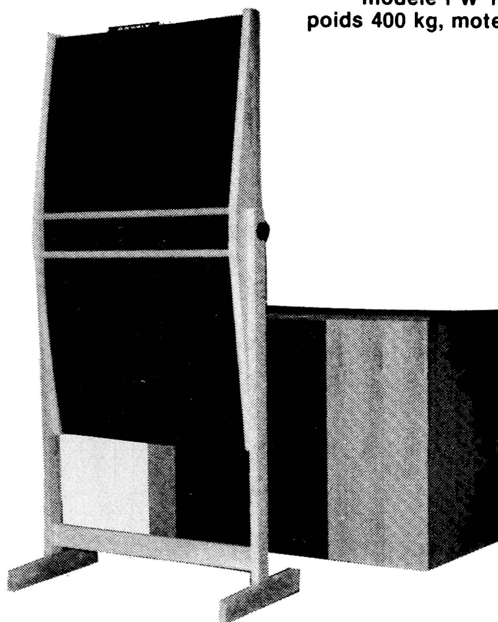


Enceinte 3 voies
Audioréférence (France)
modèle Référence 100






H.P. grave, diamètre 160 cm
d'origine Mitsubishi-Diatone (Japon)
modèle PW 1600 (1980)
poids 400 kg, moteur à excitation

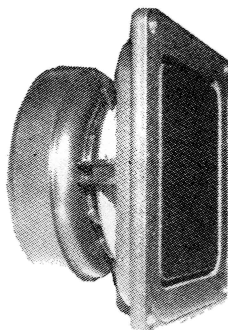


Système Mark Lévinson (U.S.A.)
modèle « HQD »
(Hartley - Quad - Decca)



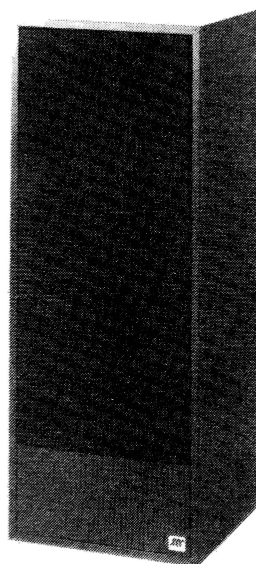
**Tweeter à pavillon Goto Unit, modèle SG 17 TT (Japon).**

**Haut-parleur à membrane plane et à bobine courte Audax, série Supra (France).**

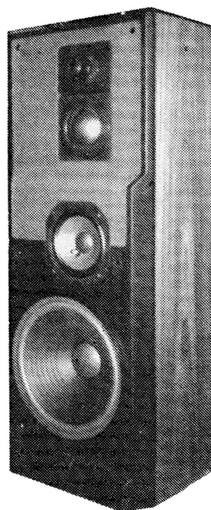




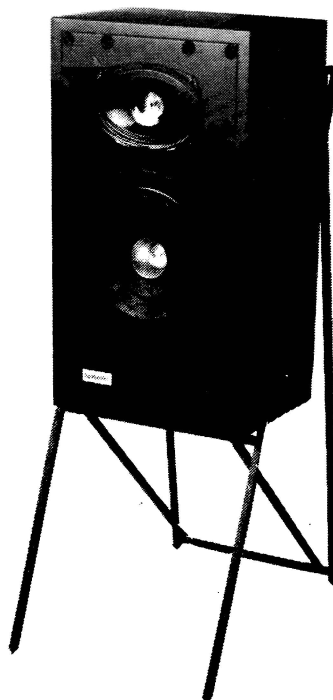
**Enceinte Magnasphère, modèle Gamma (R.F.A.).**



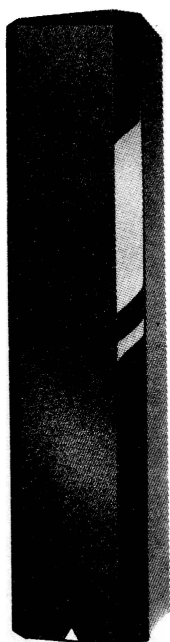
**Enceinte Jean-Marie Reynaud, modèle Millésime (France).**



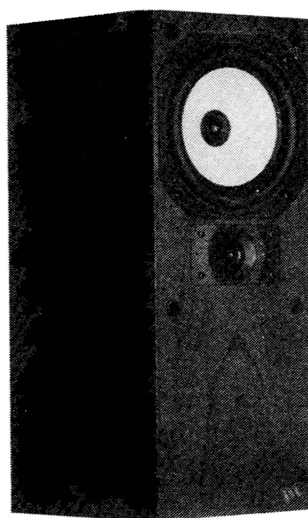
**Enceinte J.B.L., série XPL (U.S.A.).**



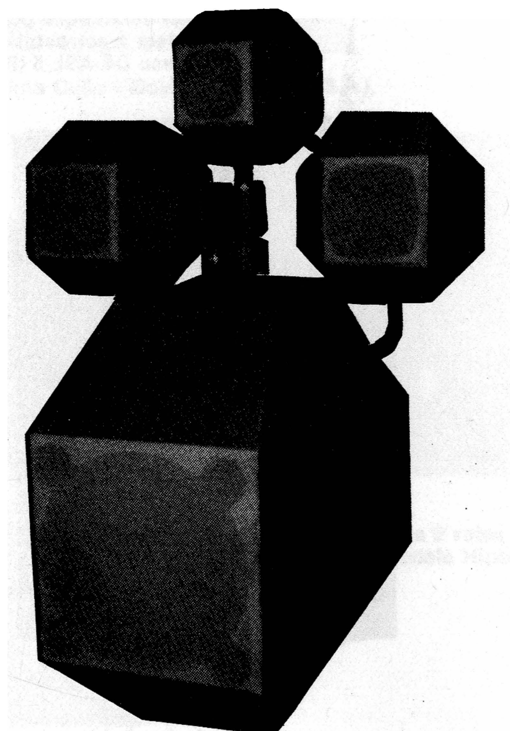
**Enceinte Rehdeko, modèle AK 15S (France).**



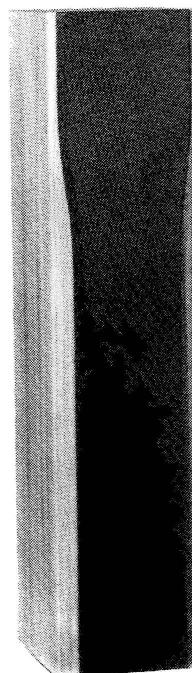
**Enceinte Triangle,
modèle Transept II (France).**



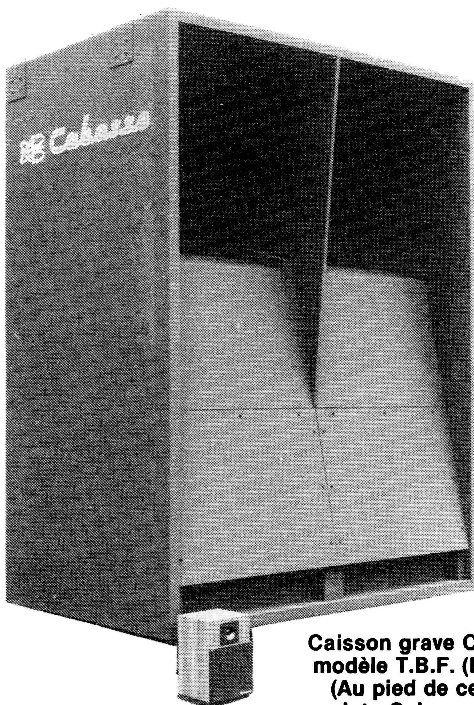
**Enceinte Vision Acoustique,
modèle MV-2 (France).**



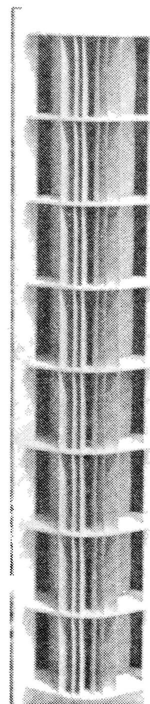
**Système AESD,
modèle Harmonique 5000 (France).**



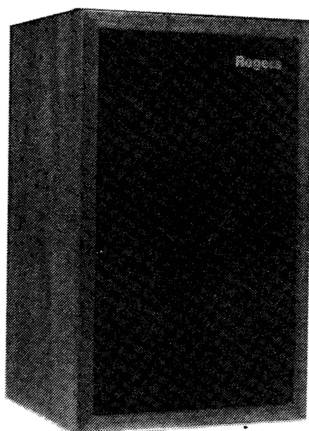
**Enceinte Leedh,
modèle Axiom (France).**




**Caisson grave Cabasse, modèle T.B.F. (France). (Au pied de celle-ci, enceinte Cabasse Galiote.)**



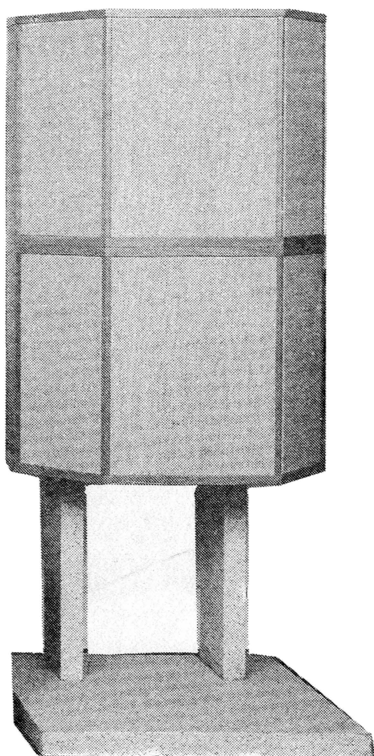
**Lentille acoustique pour haut-parleur électrostatique, modèle Klimo DK-ASL 5 (R.F.A.).**



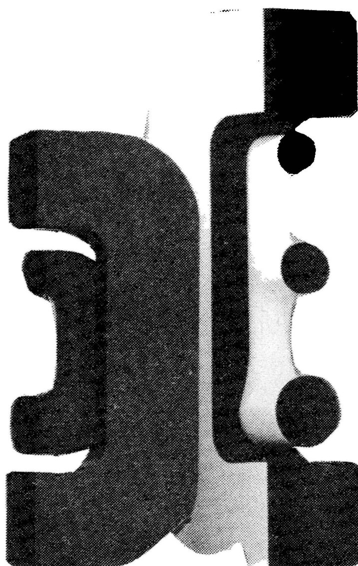

**Enceinte Rogers, modèle LS3-5A (G.-B.).**



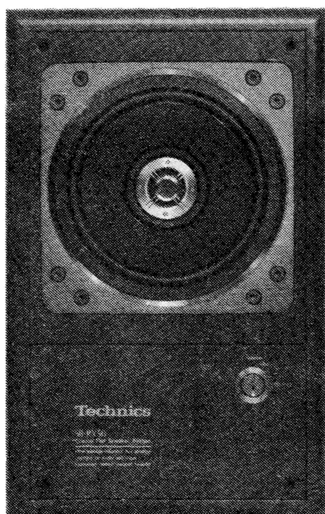
**Enceinte 3 voies Kenwood, modèle LS-G 5000 (Japon).**



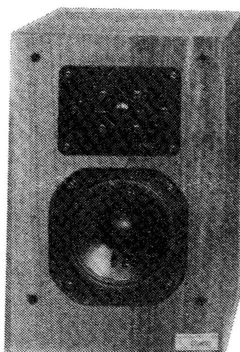
**Enceinte Cello « Double Amati » (U.S.A.).**



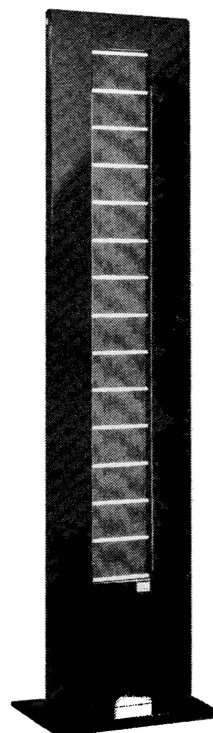
**Enceintes Synthèse 1 et 2 (Belgique).**




**Enceinte Technics
à haut-parleur coaxial plan,
modèle SB-RX50.**



**Enceinte 2 voies Chario,
modèle Hiper 1.**

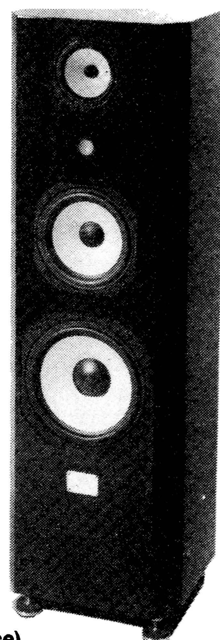


**Haut-parleur électrostatique
large bande Audiostatic,
modèle ES 300 R (Hollande).**



**Enceinte DCM
Time Window (U.S.A.).**

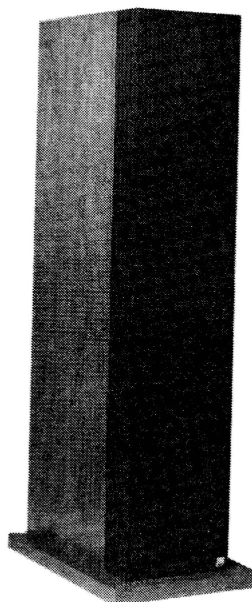




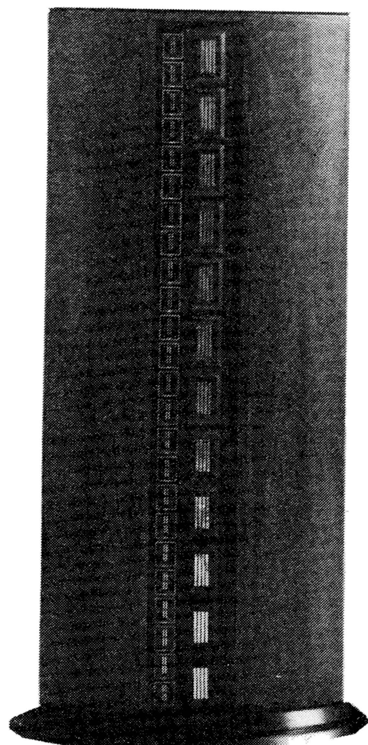
**Enceintes 3 et 4 voies
JM Lab, modèles
703 Opium et Oriane K2 (France).**

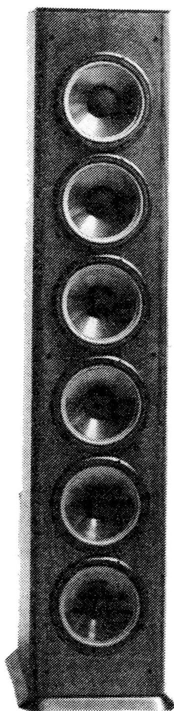


**Enceinte Tannoy,
modèle Memory (G.-B.).**

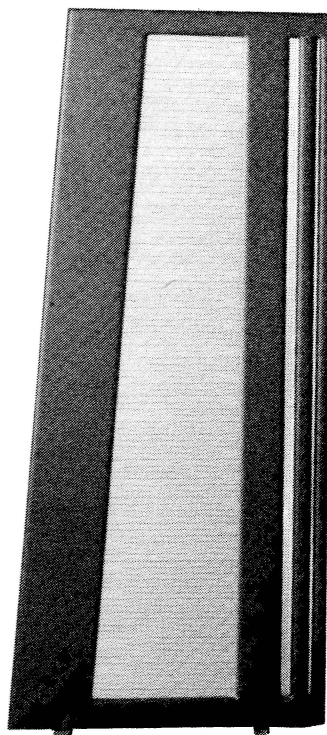


**Enceinte 4 voies Duntech,
modèle Sovereign 2001 (Australie).**

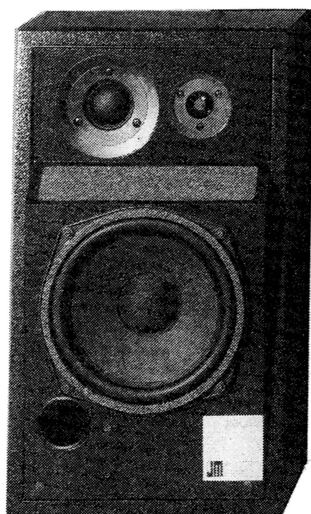




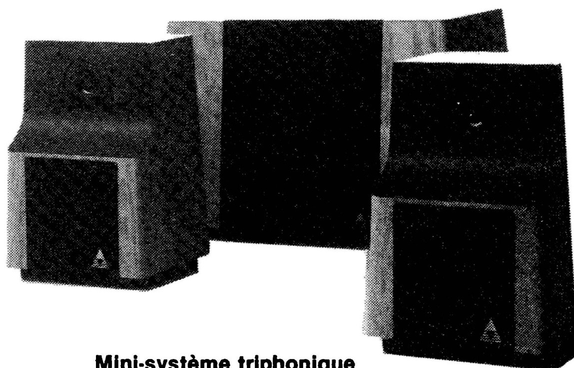
Système Infinity à colonne
grave séparée, modèle IRS V (U.S.A.).



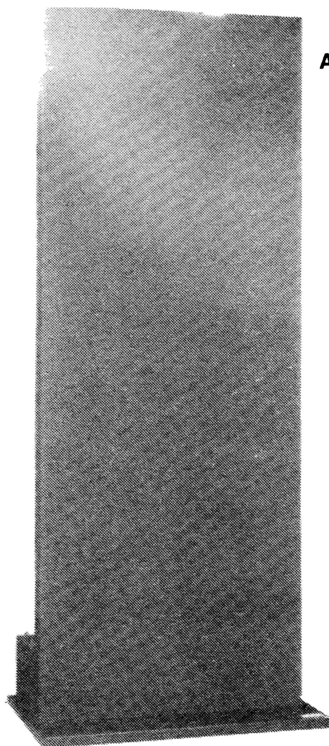
Système 3 voies large bande
à ruban Apogée,
modèle Diva (U.S.A.).




Enceinte 3 voies Jean Maurer,
modèle JM 320 D (Suisse).



Mini-système triphonique
Triad 70 (U.S.A.).

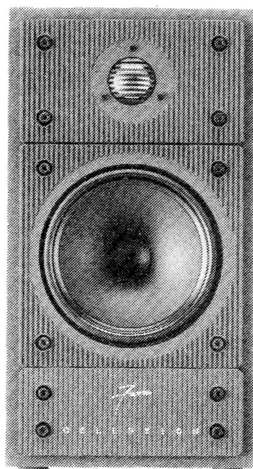


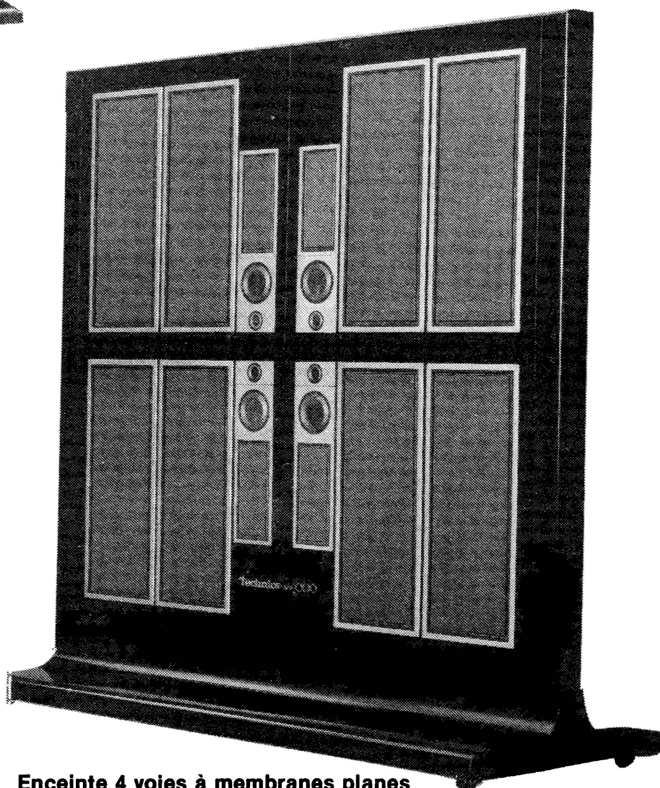
**Haut-parleur électrostatique Acoustat « Model Eight » (U.S.A.).**



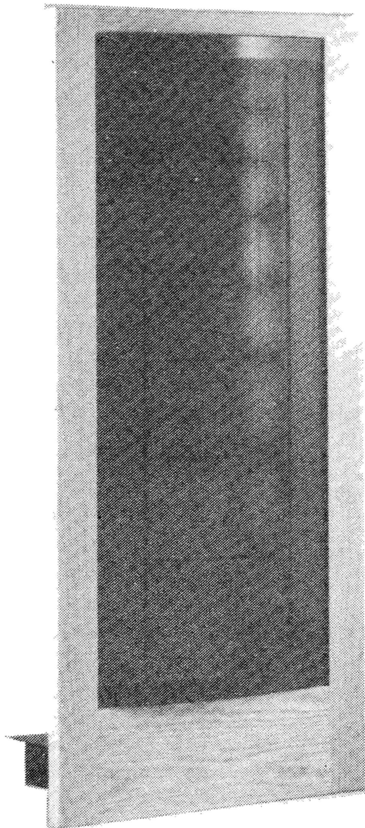

**Haut-parleur grave « Acoustic Wave Cannon System » Bose AWCS-1 (U.S.A.).**

**Enceinte 2 voies Celestion, modèle SL 700 (G.-B.).**





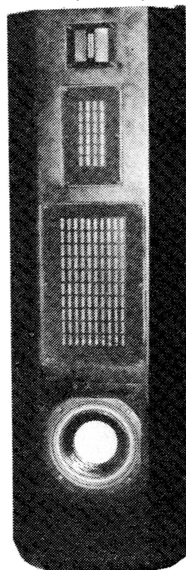
**Enceinte 4 voies à membranes planes Technics AFP 1000 (Japon).**



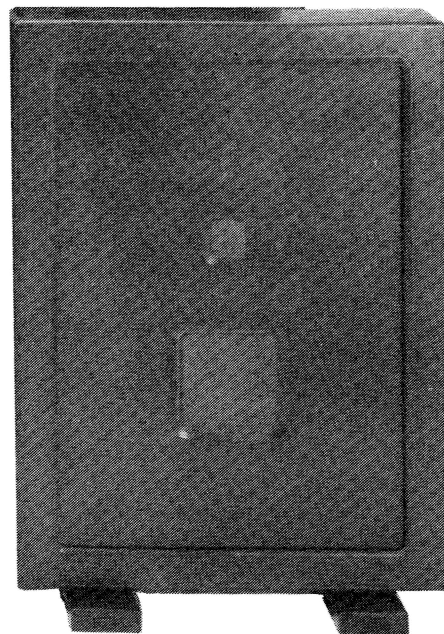
Panneau électrostatique large bande à profil curviligne Martin Logan, modèle CLS (U.S.A.).



Enceinte 3 voies Onkyo, modèle Scepter 5001 (Japon).



Enceinte 4 voies Elipson, modèle Equiphase (France).



Enceinte 3 voies à membranes planes Daïken, modèle Craft $\alpha$ 9000 (Japon).

# Bibliographie

**A.L. Thuras.**
A new loud-speaking receiver, Bell Laboratory Record, Volume 6, n° 1, March 1928

**A.L. Thuras.**
An efficient driving coil for louspeakers, Bell Laboratory Record, May 1928

**E.C. Wente and A.L. Thuras.**
A high efficiency receiver for a horn type loudspeaker of a large power capacity, Bell Technical Journal, March 1928

**N.W. Mac Lachlan.**
Transients alias « Attack », Wireless World, April 10th 1929

**R.P.G. Denman.**
In search of quality, The construction and performance of a 25 ft. logarithmic horn. Wireless World, July 31st 1929.

**Vogt**
Vogt electrostatic loudspeaker. Wireless World, May 29th 1929

**Norman P. Slade**
The « Prismustatic » Loudspeaker. Wireless World, June 1st 1932.

**Wireless World**
From January 1927 to December 1939

**E. Gerlach**
U.S. patent n° 1 749 635, March 4th 1930

**F. Tredelenburg**
Siemens Journal, vol. 378, 1930.

**A.L. Thuras.**
British Patent n° 1 869 178, 1930

**Sivian, Dunn and White.**
Absolute amplitude spectra of certain musical instruments and orchestras, J.A.S.A., vol. 2, 1931.

**N.W. Mac Lachlan.**
Loudspeakers. Oxford Press, 1934

**N.W. Mac Lachlan, S. Goldstein.**
Sound Waves of finite amplitude in an exponential horn

**Jenkins, Neil and Thuras**
Extraneous frequencies generated in an air carrying intense sound pressure

**A.L. Thuras**
Sound translating device, U.S. patent n°1 869 178, 1930

**H.F. Olson**
« A new cone loudspeaker for high fidelity reproduction », IRE 1934

**Rice, Kellogg**
Development of a new type hornless loudspeaker, J.A.I.E.E., 1925

**F.M. Wiener**
Phase distorsion in electroacoustic

**Western Electric**
Western electric manuals, 1922-1929
Western Electric bulletins, 1927-1935
Western Electric commercial products reference sheets, 1938

**Mc Millan, West**
The design of loudspeaker, IEE journal, 1940

**Lord Rayleigh**
The theory of sound, Mac Millan, 1878, reprinted in 1940

**Wente, Thuras**
Symposium on auditory perspective, AIEE, 1934

**S. Klein**
Comptes rendus, L'onde Electrique, 1946, 1951, 1952

**Revue du Son**
n° 1, 9, 1953

**R.R. Gamzon.**
U.S. patent n° 3 013 905

**S.S. Rich**
**Electronics review,**
June 1961

**Radio Gijutsu**
Review, 1953, 1954, 1955

**A.B. Cohen**
Audio, March 1960

**L.L. Beranek**
Acoustics, Mc Graw Hill, 1954

**G. Shirley**
The corona wind loudspeaker, J.A.E.S., 1957

**A.N. Thiele**
« Loudspeakers in vented boxes », I.R.E. Australia, 1961

**G.A. Briggs**
Loudspeakers, W.W.W., 1958
Stereo Handbook, 1959
Piano, pianists and sonics, 1951
Sound reproduction, July 1949
A to Z in Audio, November 1960
High fidelity, 1955
Haut-parleurs (Editions Radio), 1961

**H. Nakajima**
Hi-Fi Loudspeakers, N.H.K. publications, 1968

**R. Brault**
Basse fréquence et haute fidélité, Libr. de la Radio, 1964

**T. Mochizuki**
Radio graphs and abacus, Sankaido publ. 1949

**R. Léhmann**
Transducteurs électro-mécano-acoustiques, Edts Chiron, 1960

**H.F. Olson**
Acoustical engineering, Van Nostrand, N.J., 1957
Direct radiator Loudspeaker, A.E., 1951

**R. Léhmann**
Les haut-parleurs, Revue du Son, Mars 1956
Les haut-parleurs, Revue du Son, Janvier 1956

**E. Koïzumi**
Onken driver unit, Musen to Jikken, Nov., Dec. 1970

**T. Sashiro.**
Dome speakers, its characteristics, Radio Gijutsu, Oct. 1970

**T. Nakao**
Special squawkers units, Radio Gijutsu, Oct. 1970

**G. Sonoda**
Dome speakers, construction, Radio Gijutsu, Oct. 1970

**R. Lafaurie**

Haut-parleurs et bagues de court-circuit, Aout-Septembre 1969

**R. Lafaurie**
Le haut-parleur Orthophase, Revue du Son, Mai 1961

**R. Lafaurie**
L'Orthophase n'a pas fini de nous étonner, Revue du Son, Mai 1961

**S.Zimmerman, J.P. Dudognon**
Générateur de courant en régime impulsionnel, application à l'étude des haut-parleurs, Revue du Son, Juillet-Aout 1964

**K.Kawashima**
Lo-D Speakers system technology, Hoso Gijutsu, March 1974

**S. Kawamura, T. Sugimoto, N. Takami, I. Obara**
Low distorsion loudspeaker system, Hitachi review, Vol. 51, n° 7, 1973

**C. Gary**
Les haut-parleurs électrostatiques, Revue du Son, n° 57, Janvier 1958

**R. Lafaurie**
Le haut-parleur à ruban, Revue du Son n° 48, Février 1957

**Harold Beveridge**
U.S. Patent and technical leaflet

**Acoustat**
Acoustat X technical leaflet

**I.Nomoto, M.Iwahara, H. Onoye**
A technique for observing loudspeaker wave-front propagation

**J. Dewevre**
Le haut-parleur musical, Revue du Son, n° 165

**P.Loyez**
La physique des enceintes acoustiques, Revue du Son n° 201

**J.J. Matras.**
Aspect de l'acoustique, Revue du Son n° 3

**L. Hayashi**
31 tweeters tested, Radio Gijutsu, Dec. 1969

**B. Babani**
High Fidelity loudspeakers enclosures

**K. Shiyoyadani**
TQWT loudspeaker system, Radio Gijutsu, July 1973

**P.Loyez**
L'enceinte acoustique B 65, Revue du Son n° 142, Fev. 1965

**M. Vaissaire**
Enceintes acoustiques avec amortissement mécanique des haut-parleurs, Revue du Son, n° 127, Nov. 1963.

**E.J. Jordan**
Loudspeaker enclosures, types of baffle and the acoustical laws govering their application, Wireless World, January 1971

**A.R. Bailey**
The transmission line loudspeaker, a re-examination of the general principle and a suggested new method of construction, Wireless World, May 1972

**G. Cozanet**
Résonateur sensible en matière neutre, Revue du Son n° 142, Février 1965

**J.P. Dudognon**
Enceinte acoustique à résonance diffuse, Revue du Son n° 115, Nov. 1962

**H. Niwa**
Electro-acoustics, Ohm publications, 1936

**P. Loyez**
Choix, adaptation et amélioration des enceintes acoustiques, Revue du Son, Nov. 1969

**J. Engelking**
Le point sur les essais de haut-parleurs, Revue du Son n° 260, Dec. 1974

**M. Andrieu**
Les lentilles acoustiques, Revue du Son n° 258, Oct. 1974

**R.Léhmann**
Les haut-parleurs, principe, étalonnage et caractéristiques, Revue du Son, Juin 1955

**Pierre Loyez**
Le nombre d'or en acoustique, Revue du Son n° 244-245, 246, Aout-Sept, Oct. 1973

**T. Saeki**
Speakers systems, Radio Gijutsu, January 1977

**A.D. Broadhurst**
Loudspeaker for simulating infinite baffle, Acustica 39, 1976

**S. Kitano**
Full range electrostatic loudspeaker, Radio Gijutsu, June 1962

**N. Hayashi**
Stax report, n°3, automn 1969

**F.J.M. Frankort**
Vibrations patterns and radiation behavior of loudspeaker cones, J.A.E.S. vol. 26, n° 9, Sept. 1978

**S. Yoneyama**
Problems on audio and optical measurements, J.A.S. vol. 19 n° 4, May 1979

**K. Yamamuro**
Flat diaphragm loudspeakers, J.A.S., May 1980

**J.R. Bost**
A new piezo-electric driver, J.A.E.S., April 1980

**R. Lafaurie**
Les progrès des haut-parleurs, Le Monde, 5 Mars 1980

**K. Fuseki**
Loudspeakers technique, Nikkei Electronics, Dec. 11 1979

**Stereo Sound**
Spring 1974 review

**M. Kuriyakawa**
31 woofers tested, Radio Gijutsu, June 1970

**F. Yamamoto, K. Yamamuro.**
15 loudspeakers tested in tridimensional analysis, Radio Gijutsu, March 1976

**L.R. Fincham**
Loudspeaker system simulation using digital techniques, A.E.S., London March 1975

**D.E.L. Shorter**
Loudspeakers transient response, BBC quarterly, 1946

**N. Iwata**
Concrete horn design, 1978 Stereo Technic, Seibundo Shinkosha

**T.Okuno, S. Sakai**
Horn wave progagation under optical analysis, Radio Gijutsu, March 1979

**R.E. Cooke**
Loudspeakers, Anthology of articles, JAES 1953-1977, AES 1978

**R.E. Cooke, L.R. Fincham**
Loudspeakers testing using digital techniques, KEF Electronics, 1975

Ainsi que de nombreux autres livres, publications, revues, documentations de constructeurs publiés en anglais, français, japonais, espagnol, italien, allemand et russe, lesquels ont été compulsés en tant que bibliographie.

# Table des matières

## DANS LA MÊME COLLECTION

- **Les magnétophones** - Claude Gendre
- **Les magnétoscopes et la télévision** - Claude Gendre
- **L'optimisation des haut-parleurs et enceintes acoustiques** - Charles-Henry Delaleu
- **L'électronique des micro-ordinateurs** - Philippe Faugeras
- **Introduction à l'Audio-numérique** - Jean-Pierre Picot
- **Sélection de l'Audiophile, tome 1 : l'Electronique**
- **Sélection de l'Audiophile, tome 2 : les Transducteurs**
- **Les synthétiseurs** - Claude Gendre
- **Périphériques : Interfaces et technologie** - Philippe Faugeras
- **Le Mini-studio : théorie et pratique** - Denis Fortier
- **Le livre des techniques du son, tome 1** - Collectif d'auteurs
- **Pratique de l'Amiga** - Henri Cohen et François Dress
- **La création musicale par ordinateur** - Frédéric Levé
- **Le livre des techniques du son, tome 2** - Collectif d'auteurs
- **Introduction à l'analyse de Fourier** - Jean-François Coblentz
- **Communication** - Marianne Belis

Les bons ouvrages en français sur les haut-parleurs sont rares. Quelques livres ont bien été édités au cours des années 50 et 60 mais ils sont devenus introuvables.

En publiant cet ouvrage, l'éditeur répond aux attentes de milliers de passionnés.

Trop théorique, il ne se serait adressé qu'à une minorité de spécialistes. Trop pratique, il n'aurait présenté qu'un aspect d'un sujet très vaste.

L'auteur, Jean Hiraga, a réussi à allier théorie et pratique.

Par la somme extraordinaire d'informations qu'il rassemble, cet ouvrage peut être considéré comme l'enclyclopédie du haut-parleur. Il retrace, dans ses moindres détails, toute l'histoire du haut-parleur depuis son origine, à la fin du siècle dernier, jusqu'à nos jours : présentation et évolution des principes théoriques, des technologies, des méthodes mises en œuvre pour sa réalisation.

C'est l'ouvrage de référence qui faisait défaut jusqu'ici. Abondamment illustré de 300 figures et photos, sa lecture est attrayante autant que passionnante. Jean Hiraga a remarquablement réussi à transmettre sa passion. Il apparait ainsi comme le successeur de G.A. Briggs qui savait admirablement bien réaliser une synthese des aspects théoriques, pratiques et historiques dans des ouvrages qui restent encore très appréciés des amateurs.



*Jean Hiraga est bien connu des amateurs de haute-fidélité. Il a collaboré étroitement avec la Revue du Son dès 1967 et continue aujourd'hui à apporter son concours à la Nouvelle Revue du Son. Il est co-rédacteur en chef de L'Audiophile et collabore à de très nombreuses revues japonaises, anglaises et américaines.*




EYROLLES

